

Systematische Optimierung von Schleifprozessen für sprödharte Werkstoffe

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

Dipl.-Ing. (FH) Christian Vogt

Tag der Einreichung: 20.06.2017

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13.12.2017

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Sinzinger
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Rascher
3. Gutachter: Doctor of Philosophy (PhD) Oliver Fähnle

Kurzfassung

Diese Arbeit analysiert Prozesse zum Schleifen sprödharter Werkstoffe in der Optikfertigung in Bezug auf Mechanismen und Deterministik. Die erarbeitete Methode „Grinding Process Validation Approach (gPVA)“ ermöglicht eine systematische Auslegung und Optimierung einzelner Schleifprozesse und ganzer Fertigungsketten auf Basis von Parameter Flow Charts und standardisierten Verfahrenstests. Hierbei werden Prozessfenster für die jeweilige Schleifwerkzeug-Werkstückmaterial-Kombination ermittelt und Prozesskennlinien erstellt, die als Look-Up-Tables genutzt werden; dies gewährleistet eine quantitative und deterministische Optimierung des Betriebspunktes hinsichtlich Produktivität und Prozessstabilität, ohne dies anhand von Produktionssamples während der Fertigung auf der Maschine durchführen zu müssen. Neben einer Beschreibung der gPVA-Methodik selbst werden Ergebnisse aus Analysen bzgl. Genauigkeiten, Wirkmechanismen der kritischen Einflussgrößen sowie die Ergebnisse aus ersten Industrietests präsentiert. Des Weiteren wird die hieraus entstandene Initiative zur Entwicklung eines zu normierenden Standardtests diskutiert, welcher derzeit in einem ersten Feldtest bewertet wird. Die Ergebnisse ermöglichen die quantitative Beurteilung von Schleifwerkzeugen und Glaswerkstoffen sowie die Ableitung von Prozessparametern für die industrielle Fertigung. Es wird gezeigt, dass die Anwendung der Methodik eine wesentlich effektivere und effizientere Prozessplanung ermöglicht als der aktuelle Stand der Technik.

Abstract

This work is about the analyzation of brittle mode grinding processes for manufacturing optics in terms of mechanisms and deterministics. The devoloped gPVA-method enables systematic design and optimization of grinding processes and whole sets of grinding operations. The method is based on a parameter flow chart and a standardised testing procedure. In doing so, the processwindow for the single grindingtool-workpiece-material-combination is detected and transferred to tool performance maps, that are used as look up tables. This ensures a quantitative and deterministic optimization of points of operation in terms of productivity and stability without the necessity of optimizing processes on actual workpieces and machines. The method itself as well as the results of analysations concerning accuracy, mechanisms of critical influencing factors and results of fieldtests under industrial conditions are presented. The intention developing this method into an industrial standard is currently under discussion with a field test being implemented. The results enable a quantitative validation of grinding tools and glass materials which provides the basis to design grinding processes more efficiently compared to state of the art methods.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Aufbau der Arbeit | 3 |
| 3 | Schleifen | 3 |
| 3.1 | Mechanismen | 4 |
| 3.2 | Prozessregelung | 9 |
| 3.3 | Kraftgesteuertes Schleifen | 10 |
| 3.4 | Anlagentechnik | 13 |
| 3.5 | Schleifwerkzeuge, Bindungen | 14 |
| 3.6 | Abrichten und Verschleiß | 19 |
| 3.7 | Einflussfaktoren mittelfrequenter Fehler | 22 |
| 3.8 | Normen und Modelle | 28 |
| 4 | Zielsetzung | 30 |
| 5 | Grinding Process Validation Approach - gPVA | 32 |
| 5.1 | Funktionsprinzip gPVA | 33 |
| 5.2 | Genauigkeit | 40 |
| 5.3 | Einflussgrößen | 43 |
| 5.3.1 | Schnittgeschwindigkeit | 43 |
| 5.3.2 | Kühlschmiermittel | 44 |
| 5.3.3 | Werkstoff | 44 |
| 5.4 | Beispiele industrieller Anwendung | 45 |
| 5.4.1 | Zentrieren einer Linse durch Tandemschleifen | 45 |
| 5.4.2 | Optimierung des Randschleifens eines Linsenzylinders | 50 |
| 6 | Optimierung von Schleifsequenzen mittels gPVA | 54 |
| 7 | Normierung von Schleifwerkzeugen mittels gPVA | 55 |
| 7.1 | Schleifnorm DIN ISO 12844 | 56 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 7.2 | Eignung von gPVA | 57 |
| 7.3 | Postulierte gPVA-Norm | 58 |
| 8 | Duktiles Schleifen mit gPVA | 58 |
| 9 | Weiterführende Themen | 60 |
| 9.1 | gPVA Formalismus zur Beschreibung des Asphärenschleifens | 60 |
| 9.2 | Grolishing | 62 |
| 9.3 | In-Situ-Messung Laserpolitur | 64 |
| 9.4 | Regelkreisgestütztes Polieren | 65 |
| 10 | Zusammenfassung | 66 |
| A | Kompetenzen IPH | 67 |
| A.1 | Schleifen | 67 |
| A.2 | Polieren | 70 |
| A.3 | Verschiedenes | 70 |
| | Literaturverzeichnis | 72 |
| | Abbildungsverzeichnis | 78 |
| | Tabellenverzeichnis | 81 |
| | Abkürzungsverzeichnis | 82 |
| | Thesen zur Dissertation | 85 |
| | Erklärung | 86 |
| | Danksagung | 87 |

1 Einleitung

Schleifprozesse sind für die Herstellung einiger Produktgruppen unverzichtbar. Sie finden dann Anwendung, wenn besondere Anforderungen an Form- und Oberflächengüte bestehen und andere Verfahren aufgrund technologischer und/oder wirtschaftlicher Aspekte ausscheiden.

In vielen Fällen stellt Schleifen den letzten Schritt der Oberflächenveredelung dar, z.B. bei der Herstellung von Keramiklagern, Funktionsflächen von Nocken- und Kurbelwellen im Automobilbau oder der Herstellung von Referenzflächen bei Messtischen. In der Präzisionsoptik werden durch Schleifen sprödharter Werkstoffe lediglich Halbzeuge hergestellt, die in zahlreichen weiteren Schritten bis hin zu Form- und Oberflächentoleranzen im Nanometer- und Subnanometerbereich vollendet werden.

Übliche Formtoleranzen für geschliffene Halbzeuge der Optikfertigung liegen bei 0,5-1 Mikrometer Form- bzw. Profilfehler (Peak to Valley) (PV) bei Rauheiten von 200 nm Mittenrauhwert nach DIN EN ISO 4287 (Ra). Rauheiten an polierten Endprodukten werden mit bis zu 0,1 Nanometer (nm) Quadratischer Mittenrauhwert nach DIN EN ISO 4287 (Rq) angegeben [BG10]. Erreicht wird diese Qualität durch sequentiell angeordnete Läpp-, Schleif- und Polierprozesse. Während bei Schleifprozessen der Abtrag überwiegend mechanisch erfolgt, wird bei Polierprozessen zusätzlich eine chemische Komponente wirksam. So entstehen nach der Politur spannungs- und schädigungsfreie Oberflächen mit minimalen Rauheiten.

Da insbesondere Polierverfahren sehr zeit- und kostenintensiv sind, spielt hier Schleifen als Vorbearbeitung eine zentrale Rolle hinsichtlich der Fertigungskosten. Schleifprozesse stehen sowohl am Beginn, als auch am Ende der Wertschöpfungskette, wie z.B. das Zentrierschleifen bei der Fertigung von Linsen.

Entsprechend dem Stand der Technik müssen industrielle Verfahren für eine wirtschaftliche Fertigung folgende Kriterien erfüllen:

- Skalierbar
- Stabil
- Mitarbeiterunabhängig
- Kontrollierbar
- Optimierbar
- Transferierbar
- Deterministisch

Um diese Anforderungen zu erfüllen sind Fertigungstechnologien zur wirtschaftlichen Herstellung von sehr kleinen (Durchmesser von wenigen 0,1 mm) bis hin zu großen Optiken (Durchmesser von mehreren Metern) weltweit Gegenstand von Forschungsprojekten. Forscher publizieren jährlich zahlreiche Artikel und organisieren sich auf Plattformen der European Optical Society (EOS), Society of Photographic Instrumentation Engineers (SPIE) oder der Optical Society of America (OSA), um nur einige zu nennen.

Dabei wird unter anderem an Prozessen für folgende Anwendungsgebiete geforscht:

- Beleuchtungstechnik
- Unterhaltungselektronik (Kamera- und Beamerobjektive)
- Ophthalmologie (Brillengläser, Kontaktlinsen)
- Medizintechnik (Videoendoskope, Mundkameras)
- Lithographie (Objektive zur Belichtung von Mikrochips)
- Messtechnik (Objektive für Mikroskopie und Interferometrie)
- Astronomie (Teleskopspiegel)
- Aeronautik (Head-up-Displays, Leitsysteme)

Das genannte Produktspektrum erfordert die Herstellung von zylindrischen, planen, kugelförmigen, asphärischen und frei geformten Flächen.

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur deterministischen Gestaltung von spröden Schleifprozessen für die Glasbearbeitung in der Optikindustrie. Es werden grundlegende Zusammenhänge bei der Zerspanung sprödharter, amorpher Werkstoffe mit geometrisch unbestimmten Schneiden untersucht. Das daraus entwickelte Modell basiert auf Werkzeugkennlinien. Es dient zur standardisierten Prozessfensterbestimmung für Schleifwerkzeuge, kann zur systematischen Prozessoptimierung angewandt werden und ist prinzipiell auf andere Schleifprozesse übertragbar.

2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 3 wird die Ausgangssituation beim Schleifen sprödharter Werkstoffe beleuchtet, sowohl anhand Literatur, als auch anhand experimenteller Nachweise. Behandelt werden mitunter folgende Themen:

- Schleifen mit losem und gebundenem Korn
- Kraft- und/oder Wegsteuerung
- Aufbau von Schleifwerkzeugen
- Mechanismen von Abtrag und Verschleiß
- Modelle und Normen

Daraus leitet sich die Forschungsfrage ab:

Existiert eine experimentelle Methode zur Beschreibung von Schleifprozessen, die es ermöglicht, Prozessfenster und Bearbeitungsparameter zu berechnen und zu überwachen?

Kapitel 4 beinhaltet die gesteckten Ziele und einen Lösungsansatz. Dieser wird in Kapitel 5 erörtert und bewertet. Kapitel 6 bis 8 erläutern weitere Anwendungsgebiete der erarbeiteten Methodik. Kapitel 9 beinhaltet weiterführende Themen. Kapitel 10 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen und liefert einen Ausblick bzgl. weiterer Anwendungsgebiete. Im Anhang findet sich, neben den erforderlichen Nachweisen, eine Auflistung von Kernkompetenzen der Technischen Hochschule Deggendorf (THD).

3 Schleifen

Schleifen ist ein Verfahren, das sowohl zur Vor- als auch zur Fertigbearbeitung in vielen verschiedenen Branchen Verwendung findet. Die allgemeine Definition weist das Schleifen als Prozess aus, bei dem mit geometrisch undefinierten Schneiden Material zerspannt wird. Die verschiedenen Schleifverfahren werden in DIN 8589-11 anhand folgender Merkmale unterschieden [Sch02].:

- Form/Lage der erzeugten Fläche
- Werkzeugfläche, die den Materialabtrag durchführt (z.B. Umfangs- oder Seitenschleifen)
- Vorschubbewegung
- Vorschub- und Drehrichtung (Gleich- oder Gegenlaufschleifen)
- Art der Vorschubbewegung
- Werkstückbefestigung
- Kinematik
- Schnittgeschwindigkeit [Row09]

3.1 Mechanismen

Schleifprozesse nutzen stets einen Zerspanungsprozess mit geometrisch unbestimmter Schneide, hier in Verbindung mit amorphen, sprödharten Werkstoffen. Die Mechanismen zur Umsetzung des Materialabtrags ändern sich mit der Technologie nicht.

Schleifprozesse lassen sich in drei Verfahrensgruppen unterteilen:

Abrasion mit 3-Körperbewegung, 2-Körperbewegung und Festkörper-Partikel-Erosion.

Abbildung 3.1 stellt die wichtigsten Eigenschaften und einige Anwendungen der Verfahrensgruppen gegenüber.

Traditionell werden 3-Körper-Prozesse mit losem Korn lastgesteuert. Lastgesteuerte Prozesse mit formübertragenden Werkzeugen beinhalten den großen Vorteil, dass Verschleiß eine weniger kritische Thematik darstellt. Diese Prozesse sind selbstkorrigierend. D.h. bei großen Abweichungen zwischen Werkzeug- und Werkstückform entsteht eine geringe Auflagefläche bei konstanter Last. Damit herrschen größere Drücke in der Kontaktzone, die lokal zu höheren Abtragsleistungen führen. Mit zunehmender Abbildung der Werkzeugform auf dem Werkstück nimmt die Kontaktfläche bei gleicher Last zu, so dass Druck und Abtragsleistung sinken. Diese Verfahren findet man überwiegend bei Abrasionsprozessen mit 3-Körperbewegung, vereinzelt auch bei Prozessen mit 2-Körperbewegung. Sie werden insbesondere bei der Fertigung planer und sphärischer Flächen verwendet. Durch den Effekt der Selbstkorrektur und der Werkzeugabbildung sind die Anforderungen an die Anlagen tendenziell gering. So lassen sich bereits mit einfachen Hebelanlagen sehr präzise Optiken herstellen. Bei Prozessen mit losem Korn werden geringere Schnittgeschwindigkeiten verwendet, im Vergleich zum Schleifen mit gebundenem Korn. Bei höheren Schnittgeschwindigkeiten würden die Schleifkörner wegen der Zentrifugalkräfte nach außen getragen und nicht mehr zerspanen. Außerdem entsteht wegen der Relativbewegung Korn-Werkzeug auch am Werkzeug Materialabtrag, so dass diese Prozesse tendenziell bei hohen Qualitätsanforderungen und niedrigem Zeitspanvolumen eingesetzt werden.

Eine Erhöhung des Zeitspanvolumens erfordert hohe Schnittgeschwindigkeiten. Durch das Einbetten von Körnern im Werkzeug werden die Nachteile des hohen Werkzeugverschleißes und die Problematik der Zentrifugalkraft bei hohen Schnittgeschwindigkeiten vermieden. Sofern der Einsatz formübertragender Werkzeuge für die herzustellende Werkstückgeometrie nicht mehr in Frage kommt, steigen die technologischen Anforderungen an die verwendeten Anlagen enorm an. Die Prozessregelung erfolgt dann nicht mehr über die Last, sondern den Werkzeugweg. Dann werden zwangsläufig CNC-gesteuerte Anlagen mit mindestens zwei Linearachsen, einer Werkstückspindel für rotationssymmetrische Werkstücke und mindestens 3 Linearachsen, sowie einer Werkstückspindel für nicht rotationssymmetrische Werkstücke benötigt. Der Materialabtrag erfolgt bei ausreichend geringen Drücken duktil, wobei das erforderliche Druckniveau mitunter materialspezifisch ist. Eine weitere Druckerhöhung führt zur Bildung spröder Risse, die sich bei Entlastung im Material ausbreiten und zur Abtrennung von Materialteil-

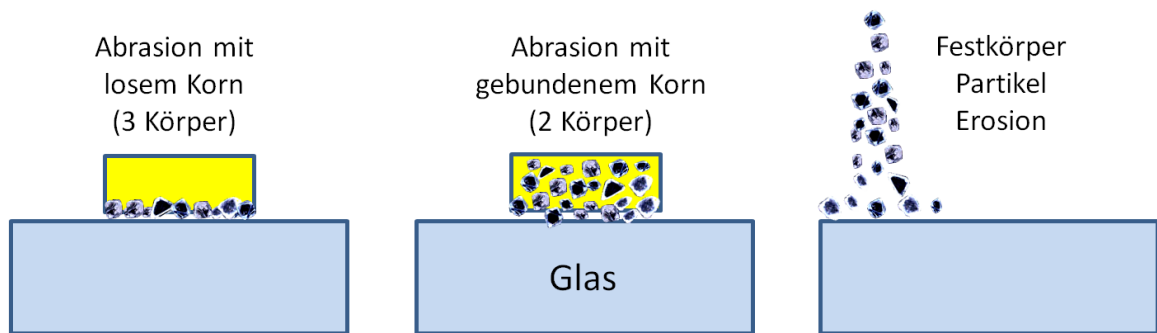


Abbildung 3.1: Funktionelle Unterteilung von Schleifprozessen

| Prozesse mit 3-Körperbewegung | Prozesse mit 2-Körperbewegung | Festkörper Partikel Erosion |
|---|--|--|
| Beispiel: Läppen | Schleifen | Strahlen |
| Merkmal: Festkörperkontakt | Festkörperkontakt | kein Festkörperkontakt |
| Regelung: Kraftgesteuert | Weg- oder Kraftgesteuert | Abtrag durch kinetische Energie gesteuert |
| Vorteile: -ungerichtete Strukturen, -einfache Anlagentechnik, -Verschleiß für Genauigkeit weniger kritisch | -hohes Zeitspanvolumen, -beliebige Geometrien, -fehlende Relativ- bewegung Korn-Werkzeug verursacht weniger Verschleiß als bei 3K | -ungerichtete Strukturen, -Verschleiß unkritisch |
| Nachteile: -Hoher Werkzeugverschleiß wegen Relativbewegung Werkzeug und Körner -geringe Abträge, -auf einfache Geometrien beschränkt | -gerichtete Strukturen, | -entweder geringe Abtragsraten oder inhomogene Flächen |

Tabelle 3.1: Bewertung von Abrasivprozessen

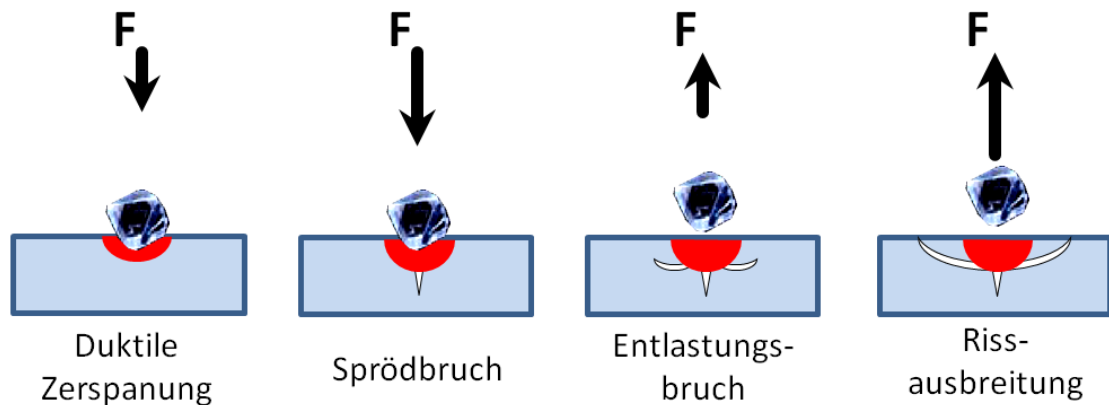


Abbildung 3.2: Prinzip Rissausbreitung

chen führen (vgl. Abbildung 3.2). Die spröde Zerspanung amorpher Gläser bewirkt Materialabtrag durch die Ausbreitung lateraler Risse, die kleinere Teilchen/Späne vom Grundkörper separieren. Teile der vertikalen Risse verbleiben nach der Zerspanung im Material. Sie werden auch als Sub Surface Damages (SSD) bezeichnet (vergleiche Abbildung 3.4) [ERR14] [Lee11].

Dieser Mechanismus wird bei sämtlichen spröde zerspanenden Verfahren für Glaswerkstoffe genutzt, wie z.B.

- Drehen
- Bohren
- Fräsen
- Sägen
- Läppen
- Schleifen mit Planetenkinematik
- Fluid-Jet-Polieren
- Wasserstrahl-Abrasivschneiden

Der materialspezifische Übergang von sprödem zu duktilem Abtrag kann durch eine sog. Spanungsdicke definiert werden. Die Literatur belegt einen Trend zu duktilem Materialverhalten bei abnehmender Spanungsdicke (z.B. 60 nm für BK7) [KLT97]

(siehe auch Abbildung 3.3).

Bei einem duktilen Zerspanungsprozess darf die sog. „critical depth of cut“ nicht überschritten werden. Die Kritische Spanungsdicke ($h_{c \text{ krit}}$) für duktile Zerspanung lässt sich aus Härte, Bruchzähigkeit und Elastizitätsmodul berechnen (siehe Gleichung 3.1, z.B. 60 nm für BK7):

$$h_{c \text{ krit}} = u \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (3.1)$$

Elastizitätsmodul (E)

Bruchzähigkeit (K_c)

Härte (H)

Materialspezifischer Faktor (u), z.B. 0.15 für Keramik [DDKF16]

Die Realisierung eines duktilen Zerspanungsprozesses erfordert erheblichen technologischen Aufwand und ist mit marktüblichen Anlagen nur bedingt machbar [VRM⁺13][Ric11][Koc92][GLC⁺13][AXRK13]. Die zu realisierenden Schnitttiefen liegen im Bereich weniger 10 nm. In der Praxis werden dafür hoch genaue Maschinen (häufig luftgelagert) eingesetzt, wobei besondere Anforderungen an die Umgebung herrschen (Klimatisierung, Schwingungsentkopplung). Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Ultrapräzisionsbearbeitung.

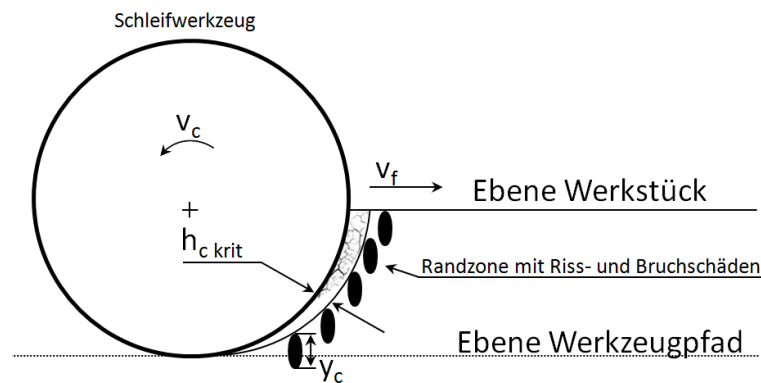


Abbildung 3.3: Modell zur duktilen und spröden Bearbeitung nach [GLC⁺13]

Neben Form- und Oberflächengüte werden SSD als Qualitätsmerkmal spezifiziert. Das Auftreten von Tiefenschädigungen ist auf das materialspezifische Bruchverhalten bei Überschreiten der Elastizitätsgrenze zurückzuführen [Sch26]. Die so beim Schleifen eingebrachten Risse pflanzen sich horizontal und lateral bis in tiefere Schichten fort.

Sie stellen ein wesentliches Qualitätsmerkmal von Schleifprozessen dar und sind ein wichtiger Zeit- und Kostenfaktor bei nachfolgenden Polierverfahren [ERR14], da sie erst in einer Vorpolitur entfernt werden müssen, bevor die eigentliche Formkorrektur stattfinden kann.

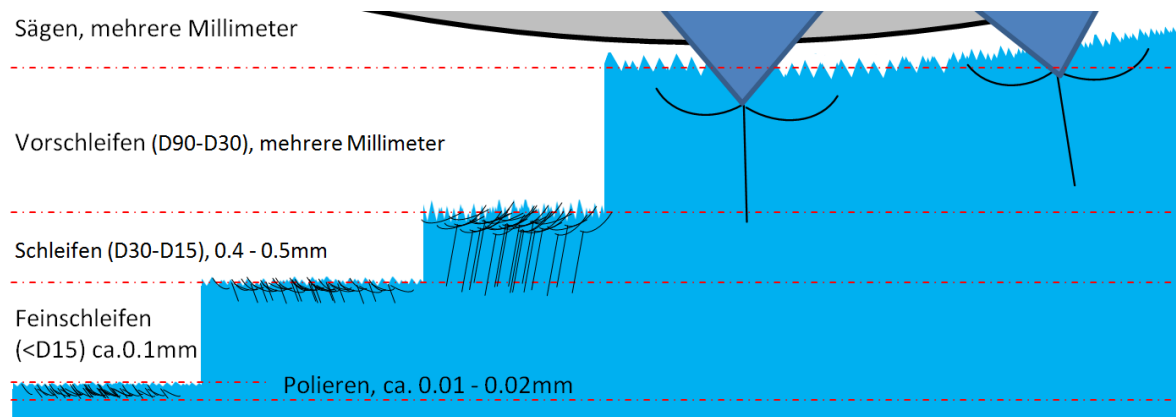


Abbildung 3.4: Prozessfolge Feinoptik

3.2 Prozessregelung

Die technologische Umsetzung eines Prozesses (z.B. Kraft oder Wegsteuerung, vgl. auch Kapitel 3.1, Tabelle 3.1) definiert die verfügbaren Stellgrößen um einen Betriebspunkt einzustellen. Das bedeutet, ein Prozessfenster muss in einer allgemein gültigen Form definiert und über geeignete Schnittstellen an die Prozessparameter gekoppelt werden. Damit ist gewährleistet, dass ein Prozess unabhängig von den technologischen Rahmenbedingungen betrachtet werden kann.

Die Art der Prozessregelung steht mit der technischen Ausstattung der verwendeten Anlage in Verbindung. Aus diesem Grund hat sich in der Praxis eine Zuordnung aus Anlagentechnik und Art der zu erzeugenden Fläche bewährt. Während bei allen Flächentypen i.d.R. ähnlich hohe Genauigkeiten gefordert werden, sind die technologischen Anforderungen an die jeweilige Anlage ggf. völlig unterschiedlich. Präzise plane und sphärische Flächen können bereits von entsprechend geschultem Personal durch Verwendung einfachster Maschinen mit Hebelkinematik durch Ausnutzung von Punktsymmetrien hergestellt werden. Die Fertigung asphärischer (mit und ohne Achsensymmetrie) und frei geformter Oberflächen erfordert bereits den Einsatz computergesteuerter Schleif- und Polieranlagen, die Bewegungsabläufe mit einer Repro-

duzierbarkeit im Bereich von 0.2 Mikrometer (μm) ausführen. Die Werkstückoberfläche entsteht aus einer geometrischen Verschneidung von Werkzeug und Werkstück. Die hierfür erforderlichen Werkzeugbahnen werden über entsprechende Computer Aided Manufacturing (CAM)-Software berechnet und von Computerized Numerical Control (CNC)-Anlagen umgesetzt [VSA11b][VRS⁺11]. Entsprechend breit ist die Spanne des erforderlichen Investments, die von wenigen 1.000 bis mehreren 100.000 Euro je Anlage reichen kann [BG10].

3.3 Kraftgesteuertes Schleifen

Ein signifikantes Merkmal kraftgesteuerter Prozesse mit formübertragenden Werkzeugen ist ein als Selbstkorrektur bezeichneter Effekt. Da das Werkzeug der invertierten Sollgeometrie des Werkstücks entspricht, besteht zu Beginn der Bearbeitung noch eine verhältnismäßig große geometrische Abweichung der Flächen von Werkzeug und Rohteil. Dadurch ist die Auflagefläche des Werkzeugs zu Beginn noch gering, während die Last über die gesamte Dauer der Bearbeitung konstant bleibt. Durch den so erhöhten Druck in der Einschleifphase werden auch höhere Abtragsraten erreicht, so dass sich die Werkstückform der des Werkzeugs asymptotisch annähert. Druck und Abtragsrate verhalten sich in Grenzen direkt proportional zueinander. Damit sind die Voraussetzungen zur Anwendung der Prestongleichung erfüllt:

$$MRR = k * P * v_c \quad (3.2)$$

Materialabtragsrate in $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (MRR)

Werkzeugkonstante (k)

Druck in $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ (P)

Schnittgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ (v_c)

Versuche an einem NC-gesteuerten Prüfstand für Pelletwerkzeuge belegen eine lineare Abhängigkeit von Abtragsgeschwindigkeit und Druck innerhalb definierter Grenzen [VSRR16]. Der Prüfstand ermöglicht die simultane Messung von Abtrag und der auf das Werkzeug wirkenden Kraft, die durch einen Pneumatikzylinder während der Bearbeitung angepasst werden kann (Vergleiche Abbildung 3.5). Abbildung 3.6 zeigt den typischen Verlauf des Pfeilhöhenabtrags während eines Tests. Bei den hier dargestellten

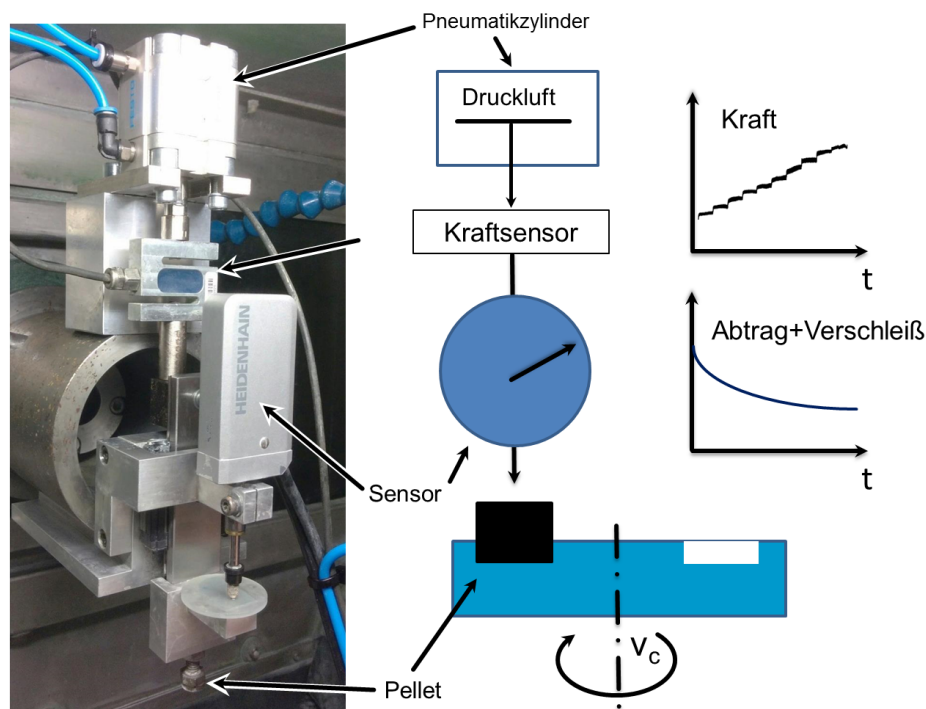


Abbildung 3.5: Prüfstand und Funktionsprinzip

Ergebnissen wurde die Anpresskraft während des Prüflaufs von 5 auf 50 N gesteigert. Die Abtragskurve wird mit zunehmender Prüfkraft steiler. Ab einer Prüfkraft von 27 N ist die Steigung der Abtragskurve konstant. Oberhalb dieser Schwelle bewirkt eine Zunahme der Last keine messbare Erhöhung der Abtragsgeschwindigkeit mehr. Etwas

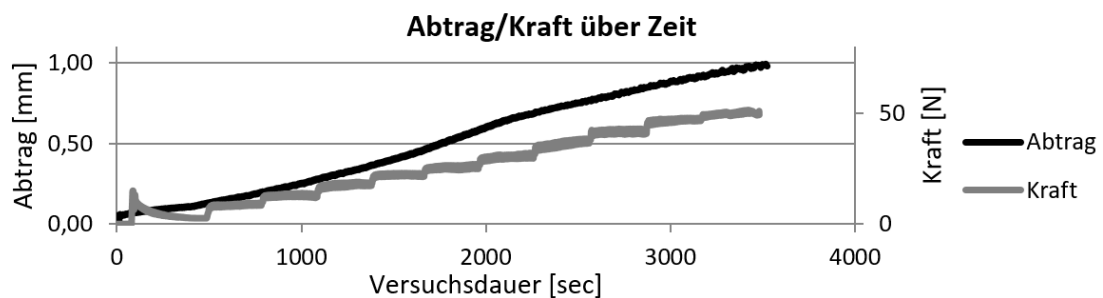


Abbildung 3.6: Typischer Verlauf des Pfeilhöhenabtrags eines Werkzeugtests, hier Werkzeugpellet Durchmesser 10 mm D15C35 Metallbindung, Schleifradius 30.9 mm, v_c $1.3 \frac{m}{sec}$, Werkstückmaterial SF57

aufschlussreicher ist die Betrachtung der Abtragsgeschwindigkeit, die in Abbildung 3.7 dargestellt ist. Im Bereich einer Last von 5-27 N verlaufen Kraft und Abtragsgeschwindigkeit direkt proportional. Oberhalb von 27 N ist die Abtragsgeschwindigkeit rückläufig. Eine weitere Erhöhung der Last auf 150 N lieferte eine 1.7 fach höhere Abtragsleistung

als bei 27 N. Der Verschleiß stieg dagegen um den Faktor 38 an. Dieser Versuch belegt, dass bei diesem Beispiel die Prestongleichung zur Beschreibung des Zerspanungsprozesses verwendet werden kann, sofern eine Last von 27 N nicht überschritten wird. Eine weitere Erhöhung der Last über 27 N hinaus bewirkt nur zu einem geringen Anteil eine Erhöhung der Abtragsleistung. Der größte Teil der Energie bewirkte in diesem Beispiel eine Erhöhung des Verschleißes. Im Bereich von 27 bis 50 N ist die Abtragsleistung sogar rückläufig. Unterschiedliche Materialien liefern abweichende Ergebnisse bei sonst

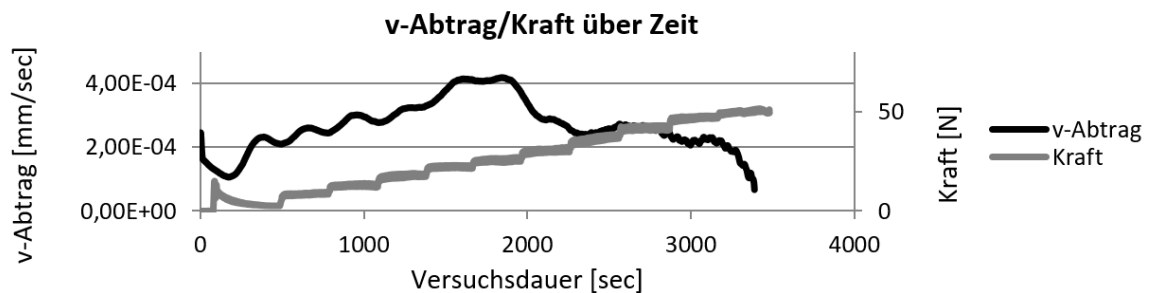


Abbildung 3.7: Typischer Verlauf der Abtragsgeschwindigkeit eines Werkzeugtests, hier Werkzeugpellet Durchmesser 10 mm D15C35 Metallbindung, Schleifradius 30.9 mm, v_c $1.3 \frac{m}{sec}$, Werkstückmaterial SF57

identischen Bedingungen. Die Selbstschärfcharakteristik eines Werkzeugs beschränkt sich damit nicht nur auf Werkzeugeigenschaften und Betriebsparameter. Es handelt sich vielmehr um eine Wechselwirkung aus Werkzeugbeschaffenheit, Parametern und Werkstoffbeschaffenheit. Dieser Effekt wird in Abbildung 3.8 deutlich. Hier ist der zeitliche Verlauf des abgetragenen Werkstoffvolumens auf BK7 und Quarz dargestellt. Werkzeug, Drücke und Relativgeschwindigkeit sind bei beiden Versuchen identisch. Während auf Quarz bereits nach ca. 20 Minuten Versuchszeit kein Abtrag mehr messbar ist, trägt das Werkzeug auf BK7 über die gesamte Versuchsdauer kontinuierlich Material ab.

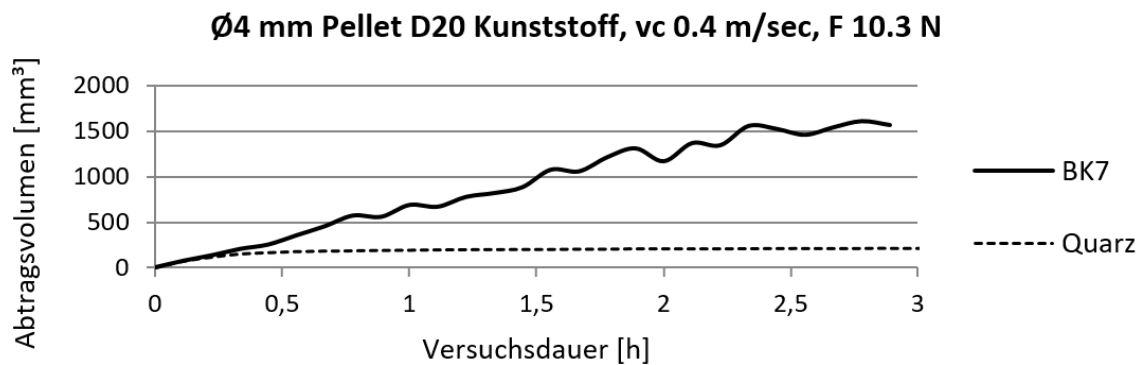


Abbildung 3.8: Abtragsverhalten desselben Werkzeugs unter identischen Bedingungen auf unterschiedlichen Materialien

3.4 Anlagentechnik

Bei der CNC-gestützten Fertigung makroskopischer Optiken haben sich Topf- und Scheibenwerkzeuge bewährt. Der weit verbreitete Einsatz von Topfwerkzeugen ist auf deren Vielseitigkeit zurückzuführen. Sie eignen sich zur Erzeugung von planen oder sphärischen Flächen sowie für Rundierungs- und Facettierungsaufgaben. Durch die linienförmige Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück können hohe Abtragsraten bei niedrigen Formabweichungen und Rauheiten erreicht werden. Zur Herstellung asphärischer Flächen mit Topfwerkzeugen wird der Anstellwinkel des Werkzeugs im Vergleich zur Sphärenfertigung geändert, so dass die Kontaktfläche Werkzeug-Werkstück nicht mehr linienförmig, sondern punktförmig gestaltet ist. Dadurch sind lokale Korrekturen möglich. Werden engere Toleranzfelder bei der Asphärenfertigung angestrebt, kommen meist kugelförmig abgerichtete Scheibenwerkzeuge zum Einsatz [BG10]. Diese können in der Anlage profiliert und geschärft und so Rundlauffehler minimiert werden.

Die Herstellung von Freiformen mittels spanender Bearbeitungsverfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden erfolgt unter Verwendung von Sub-Apertur-Werkzeugen, die in nahezu beliebigen Geometrien erhältlich sind. Vereinzelt werden Schleifstifte, deren Geometrie denen von Finger- oder Kugelfräsern ähneln kann, in Verbindung mit Fünfachsmaschinen oder Robotern mit bis zu sieben Achsen eingesetzt (siehe Kapitel 3.5).

Eine typische CNC-Schleifmaschine für die Präzisionsoptik verfügt über mindestens drei orthogonale Linearachsen sowie mindestens eine Rotationsachse. Spindeln und

Linearführungen von Standardmaschinen sind häufig wälzgelagert. Linearachsen mit Kugelumlaufspindeln und Servoantrieb sind übliche Bauformen. Einzelne Hersteller bieten mittlerweile Maschinen mit Linearantrieben für erhöhte Maschinendynamik an. Bei besonders hohen Anforderungen an die Genauigkeit werden luft-, magnetisch oder hydrostatisch gelagerte Spindeln und Führungen angeboten. Bei Hydrostatiksystemen gleiten Lager bzw. Führung verschleißfrei auf einem Ölfilm. Dieser Konstruktionstyp weist schwingungsdämpfende Eigenschaften auf und soll hochfrequente Fehleranteile reduzieren [Per12]. Gängige Konstruktionselemente für den Bau von Schleifmaschinen sind Gitterrohrrahmen, Mineral- oder Graugussbetten und/oder Granitelemente. Die Eigenfrequenz der Maschinenkonstruktion ist im Idealfall möglichst niedrig [KBW⁺14]. Gewichtsangaben marktüblicher Anlagen für kleine bis mittelgroße Bauteile (bis ca. 300 mm Durchmesser) liegen bei ca. 2 bis 15 Tonnen. In Maschinendatenblättern finden sich i.d.R. keine Angaben zu erzielbaren Genauigkeiten, da die Bauteilqualität durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Anlagenseitig maßgeblich sind Maschinen-
genauigkeit, Dynamik und Steifigkeit. Typische Zustellgenauigkeiten liegen im Bereich von 0,1 bis 2 μm .

3.5 Schleifwerkzeuge, Bindungen

Das Bindeglied zwischen Anlage und Werkstück bilden Schleifwerkzeuge. Das am Markt verfügbare Spektrum an Schleifwerkzeugen ist noch vielfältiger als die der Anlagentechnik selbst. Schleifwerkzeuge sind in zahllosen Formen und Materialzusammensetzungen erhältlich. Prinzipiell bestehen Schleifwerkzeuge aus einem Träger, auf dem ein Schleifbelag aufgebracht ist. Es kommen verschiedenste Materialien für Tragkörper zum Einsatz, je nach Werkzeugtyp und Verwendungszweck (vgl. Abbildung 3.9).



Abbildung 3.9: Werkzeuge für asphärische und frei geformte Flächen

Bei Einwegwerkzeugen kann der Tragkörper z.B. aus Zellstoff (wie bei handelsüblichem Schleifpapier) und/oder Polymer bestehen. Bei Werkzeugen für die Optikfertigung werden häufig wieder verwendbare Tragkörper aus Stahl oder Aluminium verwendet. Der Tragkörper ist mit einer abrasiven Schicht belegt. Diese beinhaltet Schleifpartikel aus Materialien, die eine höhere Härte aufweisen als der zu bearbeitende Werkstoff. Die Abrasivstoffe können in Größe, Größenverteilung, Form und Material angepasst werden. Ebenso können Bindemittel variiert und ggf. um Füllstoffe ergänzt werden [DT11], [BG10]. Die Werkzeuge unterscheiden sich in Geometrie, Belagaufbau, Bindungswerkstoff, Kornart, -form und -verteilung. Um die Porosität und damit das Spanraumvolumen zu erhöhen, besteht die Möglichkeit, bei der Herstellung Polymer- oder Wachsgrenulate in die Bindung einzubringen, die nach Fertigstellung wieder ausgeschmolzen werden [DT11]. Formen und Größen sind nahezu beliebig. So werden z.B. zur Konturbearbeitung und Einbringung von Funktionsflächen in Touchpanels für Smartphones, Werkzeuge mit nur wenigen mm Durchmessern zum Seiten- und Umfangsschleifen eingesetzt. Für die Herstellung von Großspiegeln werden mitunter Schleifscheiben mit bis zu 300 mm Durchmesser verwendet. Als Bindemittel dienen Polymere, Metalle, Keramikmatrizen und Mischungen, die mit unterschiedlichsten Methoden hergestellt werden. Metallbindungen können beispielsweise gesintheriert oder auch durch galvanische Abscheidung hergestellt werden, während bei Polymeren eine Vielzahl weiterer Systeme zur Verfügung steht. So z.B. Additions- oder Kondensationsvernetzung von Duroplasten sowie diverse thermisch gestützte Urformverfahren, wie Spritzgießen oder Sinthern von Thermoplasten.

Abrasivpartikel für Schleifwerkzeuge sind in unterschiedlichen Formen und Härten erhältlich. Gängige Formen sind blockig oder tetraederförmig. Abbildung 3.10 zeigt eine Konfokal-Aufnahme einer Trennschleifscheibe mit pyramidenförmigen Aluminiumoxidpartikeln, die speziell für Trennschleifprozesse hergestellt wurden. Als Kornmaterial wird Diamant, Kubisches Bornitrid (CBN), auch als Abrasive Boron Nitride, Elbor oder Kunonit bezeichnet) oder Aluminiumoxid verwendet[MTI00]. Der Anteil an Diamantkörnern wird über die Kennzahl Kornkonzentration nach DIN 69800 (C) angegeben. Übliche Kornkonzentrationen bei Diamantwerkzeugen sind C38 bis C150 (vgl. Tabelle 3.2).

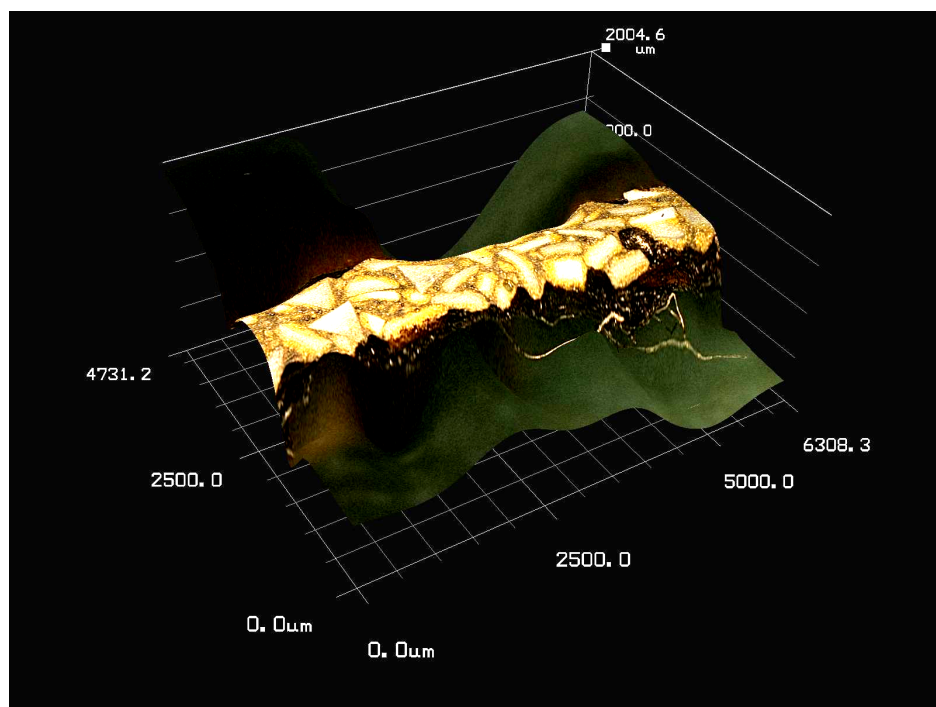


Abbildung 3.10: Konfokale Aufnahme einer Trennschleifscheibe mit Aluminiumoxidkörnern

| Kennzahl Konzentration | $\frac{\text{Karat}}{\text{cm}^3}$ | Kornanteil Bindungsvolumen [%] |
|------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| C175 | 7,70 | 43,75 |
| C150 | 6,60 | 37,50 |
| C125 | 5,50 | 31,25 |
| C100 | 4,40 | 25 |
| C75 | 3,30 | 18,75 |
| C50 | 2,20 | 12,50 |
| C38 | 1,65 | 9,50 |

Tabelle 3.2: Kornkonzentrationskennzahlen, Korngehalt in Karat und Prozent [Ard00]

CBN erreicht etwa 63% der Härte von Diamant. Es wird künstlich bei Temperaturen von 1700 °C und Drücken von ca. 50.000 bar hergestellt. Die Kristallstruktur kann gezielt eingestellt werden (häufig Oktaeder- oder Tetraederstrukturen) [Mei11]. Diamantwerkzeuge werden mit einer Diamantkorngröße in Mikrometern (D) gekennzeichnet. Es werden sowohl natürliche als auch synthetische Diamanten für die Herstellung von Schleifwerkzeugen eingesetzt.

Bei Verfahren mit Festkörper-Partikelerosion werden bevorzugt synthetische Diamanten verwendet. Sie neigen aufgrund ihres homogenen Gefüges weniger zum Splintern. Dadurch bleibt die kinetische Energie der Körner während der Bearbeitung stabiler als bei Verwendung von Naturdiamanten.

Die Angabe der Korngröße nach Federation of European Producers of Abrasives (FEPA) bezieht sich auf die Maximalgröße der enthaltenen Körner. Regional abhängig erfolgt die Angabe der Korngröße auch nach Anzahl der Maschen pro Quadratzoll des verwendeten Siebes (Mesh) gemäß American National Standards Institute (ANSI) oder Japanese Industrial Standard (JIS).

Die erhältlichen Abstufungen gemäß FEPA sind 36, 46, 54, 64, 76, 91, 107, 126, 151, 181, 213 (...) bis 1181 μm . Übliche Korngrößen für Feinschleifwerkzeuge sind 20, 15 und 10 μm .

Bezeichnungen von Diamantschleifwerkzeugen beinhalten „D“ für Diamant, gefolgt von der Korngröße in Mikrometern, sowie „C“ für die Kornkonzentration. C100 entsprechen dabei $4,4 \frac{\text{Kt}}{\text{cm}^3 \text{Schleifbelag}}$ (vgl. Tabelle 3.2). Detaillierte Angaben über das Bindungsmaterial sind i.d.R. nicht erhältlich.

Die Bindung beeinflusst die Eigenschaften eines Werkzeugs maßgeblich. [Tsc05] unterscheidet Bindungen in mineralische (Keramik, Magnesit, Silicat) und organische (Kunstharz, Gummi, Naturharz). Darüber hinaus sind Metallbindungen bei Prozessen für optische Gläser weit verbreitet und finden auch für keramische Materialien Anwendung [MTI00] [BG10]. Schleifwerkzeuge mit metallisch gebundenen Diamantkörnern zeichnen sich durch hohe Formstabilität und konstante Abtragsleistungen bei vergleichsweise hohen Standzeiten aus.

Um das Schleifkorn in die Bindung einzubringen, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Einschichtig aufgebaute Werkzeuge können mit Setzautomaten belegt oder elektrostatisch bestreut werden, so dass ein sehr gleichmäßiger Kornüberstand und große Spanräume entstehen. Außerdem ist eine gezielte Ausrichtung des Korns möglich, wobei dann immer nur eine Lage mit Körnern zur Verfügung steht [ZG15]. Einschichtige Werkzeuge müssen bei Erreichen der Verschleißgrenze erneut belegt werden. Das Abrichten und Profilieren auf der Anlage im Rahmen der Arbeitsvorbereitung entfällt zu Lasten eines schlechteren Rundlaufs. Bei entsprechender Anlagentechnik lassen sich mit solchen Werkzeugen auch mit Korngrößen im 0.1 mm-Bereich (z.B. D191) Rauheiten von unter 10 nm Ra erzeugen [Ric11].

Die Werkzeugzusammensetzung wird in Abhängigkeit von zu bearbeitendem Werkstoff, Werkzeuggeometrie bzw. Kinematik und Prozessziel gewählt. Bei großen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück sind hohe Drücke schwieriger zu realisieren. Niedrige Drücke bewirken geringere Selbstschärfeffekte bei der Zerspanung, so z.B. beim Planschleifen mit Planetenkinematik bei der Waferherstellung. Die hier eingesetzten Werkzeuge basieren meist auf runden Metallplatten, die mit Schleifbelägen beklebt werden. Die Belegungsichte bzw. die Strukturierung des Schleifbelags ist so gestaltet, dass für den Prozess notwendiges Kühlschmiermittel an die erforderlichen Bereiche gelangen kann. Strukturierte Beläge kompensieren die Problematik niedriger Drücke bei großen Kontaktflächen und begünstigen Selbstschärfeffekte sowie Selbstkorrektur (vgl. Abbildung 3.11) [KMM⁺13]. Um eine hohe Selbstschärfung trotz niedriger Drücke zu erreichen, empfehlen Hersteller geringere Kornkonzentrationen. Bei Prozessen mit kleinen Kontaktflächen, wie z.B. dem Schleifen von Asphären, ist Werkzeugverschleiß jedoch kritisch, da er sich direkt auf die Formtreue des Werkstücks auswirkt. Um hier eine hohe Formstabilität und geringe Verschleißraten zu erreichen, werden höhere Kornkonzentrationen (C100-C200) verwendet.

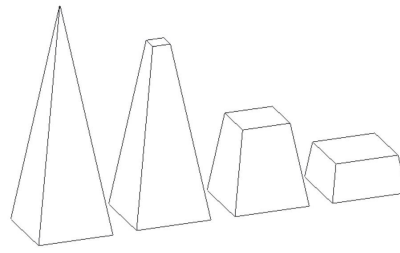


Abbildung 3.11: Prinzip pyramidenförmig strukturierter Schleifbelag

3.6 Abrichten und Verschleiß

Technologien zur Werkzeugkonditionierung gliedern sich in die Gruppen sequentiell und kontinuierlich. Kontinuierliche Verfahren wirken während der Bearbeitung auf das Werkzeug. Dabei wird das Bindungsmaterial der Schleifscheibe stetig zurückgesetzt, so dass kontinuierlich neue Schleifkörner frei werden. Realisieren lässt sich dies mit Technologien wie Electro Discharge Machining (EDM) [Kli10][XXL⁺12] oder ELectrolytic In process Dressing (ELID) [ZG15][IKB⁺08]. Beim ELID-Verfahren wird der metallische Bindungswerkstoff der Schleifscheibe über Elektrolyse in Metalloxid umgewandelt. Die Metalloxide sind elektrisch isolierend und verhindern eine weitere Umwandlung von Bindungswerkstoff, bis sie während der Zerspanung abgerieben werden. Durch diesen Effekt regelt sich der Aufbau der Oxidschicht selbst. Die Oxide bewirken eine Glättung der Werkstückoberfläche, so dass sehr niedrige Rautiefen hergestellt werden können. Durch die kontinuierliche Umwandlung von Bindungswerkstoff in Oxid werden permanent scharfe Körner nachgeliefert. Die Oxidschicht hat zusätzlich einen dämpfenden Effekt. So entstehen bei der Bearbeitung mit ELID-Unterstützung kaum Kraftspitzen, wie in Abbildung 3.12 zu sehen. Bei sequentiellen Verfahren müssen die Werkzeuge vor Benutzung abgerichtet und geschärft werden. Beim Abrichten wird die geometrische Form des Werkzeugs erzeugt. Beim anschließenden Schärfen wird die Mikrogeometrie des Werkzeugs durch Zurücksetzen der Bindung geformt. Mit geeigneten Verfahren wird das Bindungsmaterial soweit zurück gesetzt, dass ein Kornüberstand von bis zu 30 % des Korndurchmessers erreicht wird (vgl. Abbildung 3.14).

Um den Selbstschärfprozess zu starten und von Beginn an eine hohe Prozessstabilität bei gleichbleibender Qualität zu gewährleisten, muss das Werkzeug nach dem Schärfen eingeschleift werden [Min99]. Durch das Einschleifen von Werkzeugen werden einige Stadien des Werkzeugverschleißes vor der eigentlichen Bearbeitung übersprungen. Das Werkzeug weist nach dem Abrichten eine andere Mikrostruktur auf als nach einem Selbstschärfzyklus. Der Kornüberstand ist nach dem Abrichten üblicherweise deut-

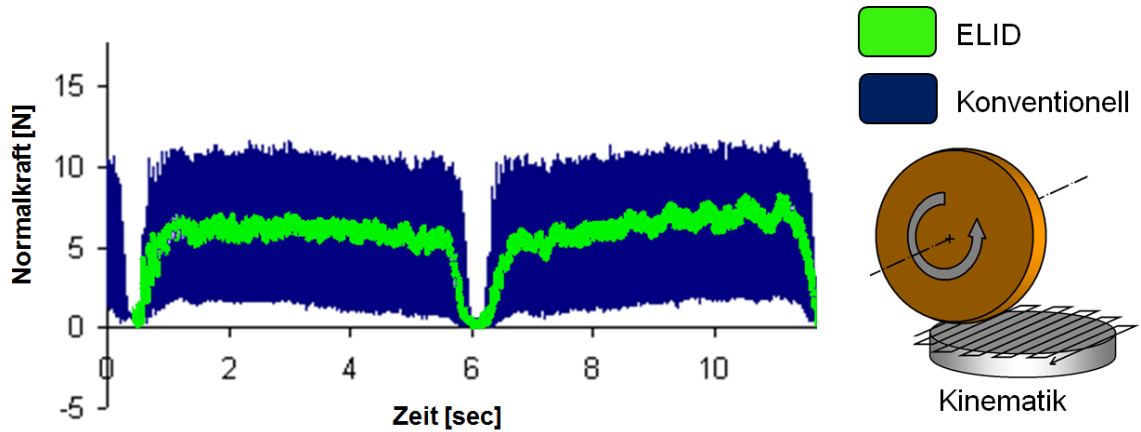


Abbildung 3.12: Kraftmessung während eines Abtragsversuchs mit und ohne ELID-Unterstützung auf Siliziumcarbid in Mäanderbahnen.

lich höher als bei eingeschliffenen Scheiben. Dadurch tritt zu Beginn der Bearbeitung hauptsächlich Verschleiß durch Kornausbruch und Kornabbruch auf. Auch sind zu Beginn hauptsächlich Überkörner im Eingriff, die weiter herausragen und damit einen größeren Anteil des Abtrags erzeugen als tiefer liegende Körner. Das führt dazu, dass unmittelbar nach dem Abrichten eine andere Rauheit auf dem Werkstück erzeugt wird, als bei stationärer Selbstschärfung. Abbildung 3.13 gibt einen Überblick über die auftretenden Verschleißmechanismen in Abhängigkeit zum bezogenen Zeitspanvolumen Q_w :

$$Q_w = \frac{\dot{V}}{f_r} \quad (3.3)$$

Bezogenes Zeitspanvolumen (Q_w)

Zeitspanvolumen (\dot{V})

Radialer Vorschub in mm (f_r)

Die in dieser Arbeit betrachteten Schleifwerkzeuge sind mehrschichtig aufgebaut und werden vor der Bearbeitung konditioniert und eingeschliffen.

Unterlässt man das Einschleifen geschärfter Werkzeuge, kann man sowohl bei der Rauheit als auch bei den Passivkräften eine Konvergenz gegen eine Asymptote beobachten. Aufgrund des hohen Kornüberstandes unmittelbar nach dem Schärfen sind die Passivkräfte anfangs geringer. Der Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück erfolgt zunächst nur über die weit herausragenden Kornspitzen (vgl. Abbildung 3.15 A). Mit zunehmendem Werkzeugverschleiß nimmt auch das Bindungsmaterial an der Zerspanung teil (Abbildung 3.15 B). Mit fortschreitender Selbstschärfung erfolgt ein periodischer Wechsel zwischen Zurücksetzen der Bindung und Austragen verschlissener

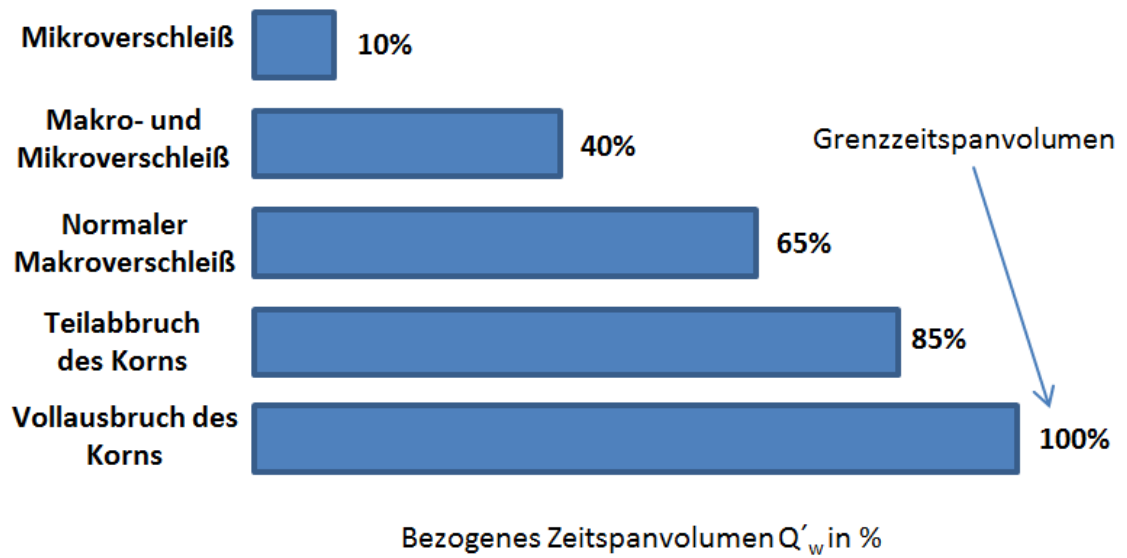


Abbildung 3.13: Verschleißmodell nach [Mei11]

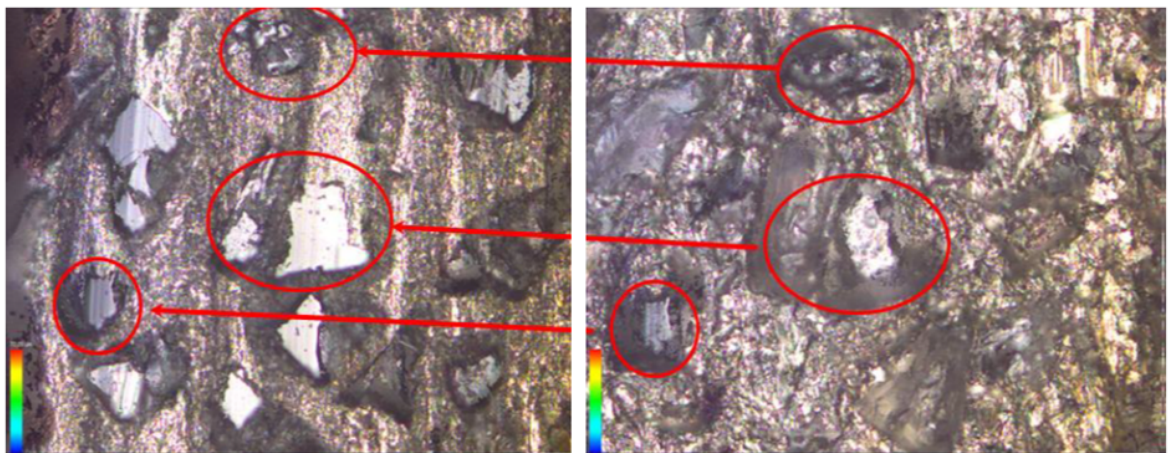


Abbildung 3.14: D91C70 vor (links) und nach dem Abrichten (rechts)

Körner (Abbildung 3.15 C und D)[VRR13][VRS13]. Dieser Wechsel führt zu einer messbaren Schwankung der Rauheit in Serienprozessen. Ein stabiler Selbstschärfprozess

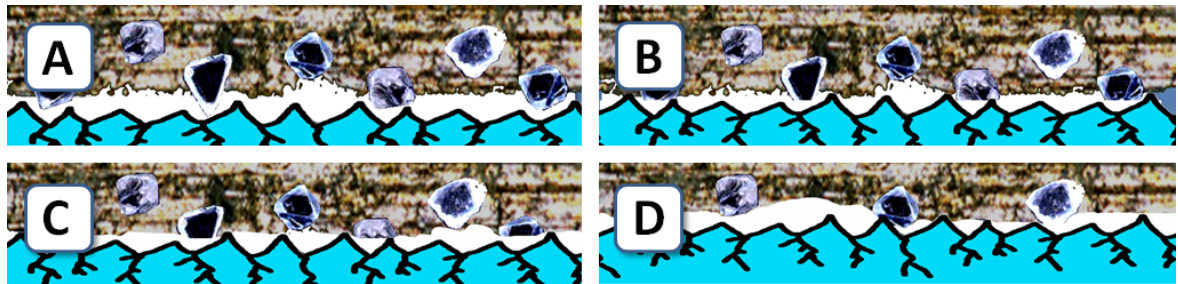


Abbildung 3.15: Verschleißmodell Selbstschärfung

führt zu einem periodischen Rauheitswechsel um einen Mittelwert (siehe Abbildung 3.16). Die Rauheitsschwankung entsteht durch den parallelen Verlauf verschiedener Zerspanungsprozesse. Dabei nehmen verschlissene Körner, neu freigelegte, scharfe Körner und Teile der Bindung an der Zerspanung teil. Die Passivkräfte weisen einen analogen Verlauf auf. Bei stabiler Selbstschärfung wird die Werkzeugstandzeit durch eine zunehmende geometrische Abweichung des Werkzeugs definiert. Sie lässt sich überschlägig über das sog. Güteverhältnis, oder auch G-Verhältnis ermitteln. Das G-Verhältnis wird ohne Einheit angegeben und aus $\frac{\text{Abgetragenes Volumen}}{\text{Verschlissenes Werkzeugvolumen}}$ gebildet. Übliche Werte liegen bei 1500 bis 2500, abhängig von Werkzeug und Prozess.

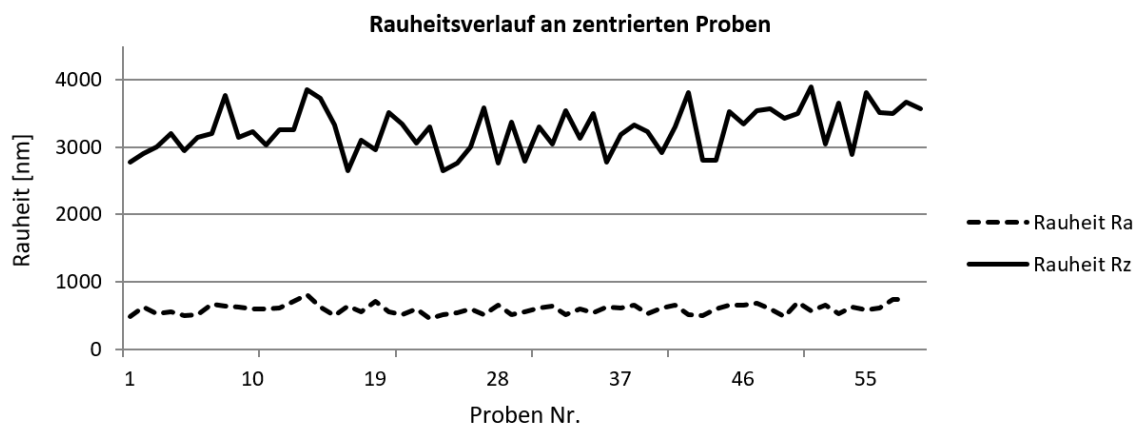


Abbildung 3.16: Rauheitsverlauf über Probennummer, industrielle Fertigung

3.7 Einflussfaktoren mittelfrequenter Fehler

Ausprägungen von Oberflächencharakteristiken müssen in nahezu allen Stadien der Fertigung berücksichtigt werden. Die Prozesse werden im Lauf der Fertigungskette

zwar im Prinzip immer genauer, sie sind jedoch nicht zur Beseitigung aller Fehlerarten geeignet. Die Prozesse in der Fertigungskette müssen darum so aufeinander abgestimmt werden, dass nur Oberflächenfehler entstehen, die durch den jeweiligen Folgeprozess optimal beseitigt werden können.

Mittelfrequente Fehler sind bei Polierverfahren besonders problematisch. Dabei handelt es sich um Erhebungen und Vertiefungen, die so auf der Oberfläche verteilt sind, dass bei der Politur der Effekt der Selbstkorrektur nicht mehr greift und eine lokale Korrektur über Verweilzeitsteuerung (abhängig von der Spotgröße des verwendeten Polierverfahrens) nicht mehr möglich ist. Das kann dazu führen, dass die betreffende Optik trotz hoher Formgenauigkeit und niedriger Rauheit ausgesondert werden muss. Die problematischen mittelfrequenten Fehler oder auch „Mid-Spatial-Frequencies“ liegen in einem Wellenlängenbereich von 0,08 mm und ca. 3-5 mm, bei Amplituden von wenigen 100 nm und darunter.

Diese Fehlerart muss sowohl seitens der Fertigungstechnik, als auch seitens der Messtechnik berücksichtigt werden. In der Messtechnik stehen verschiedene Messmittel mit unterschiedlichem lateralem und vertikalem Auflösungsvermögen und Bildfeld zur Verfügung. Nicht alle Messmittel sind zur Analyse aller Arten mittelfrequenter Fehler geeignet. Hochpräzise Geräte, wie z.B. Rasterkraftmikroskope, verfügen zwar über eine hohe laterale und vertikale Auflösung und Genauigkeit, das verfügbare Bildfeld ist jedoch i.d.R. zu klein, um Fehler mit Wellenlängen oberhalb von 100 μm zu erfassen. Profilometer dagegen eignen sich um große Messlängen (mehrere 10 mm) zu erfassen, verfügen aber häufig nicht über die notwendige Auflösung (vgl. Abbildung 3.17). Je nach verwendetem Messmittel führt das zu abweichenden Aussagen hinsichtlich der Oberflächencharakteristik (vgl. Abbildung 3.17). Dieser Umstand muss bei der messtechnischen Erfassung von Oberflächenfehlern berücksichtigt werden.

Die Erzeugung dieser Strukturen findet bereits bei der Vorbearbeitung statt, wobei es sich um ein Zusammenspiel verschiedener Fehlerquellen und Mechanismen handelt (vgl. Tabelle 3.3). Beim Schleifen entsteht ein Teil der Oberflächenstruktur durch eine als kinematische oder geometrische Rauheit bezeichnete Komponente. Ihre Größenordnung liegt oberhalb der Toleranzen von Werkzeug und Maschine. Sie entsteht durch die geometrische Verschneidung von Werkzeug- und Werkstückoberfläche und wird hauptsächlich über Werkzeugdurchmesser und Verfahrensweg beeinflusst (vgl. Abbildung 3.18). Der geometrischen Rauheit überlagert ist eine durch den eigentlichen Zerspanvorgang erzeugte Mikrostruktur, die im Wesentlichen von der tatsächlich erzeugten Spanungsdicke

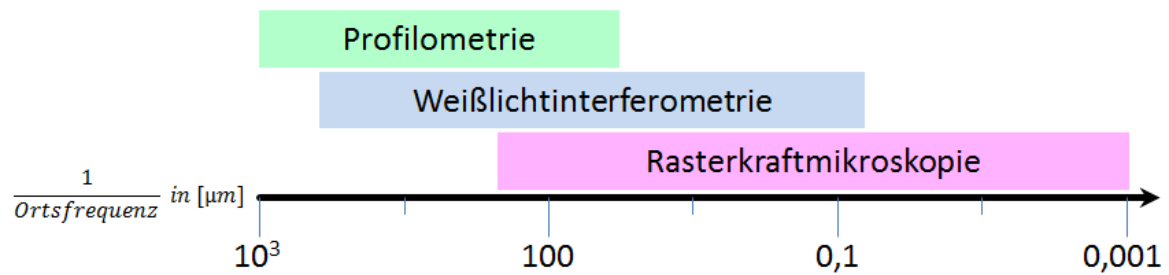


Abbildung 3.17: Auflösungsvermögen verschiedener Messmittel [CFS17]

| Ursache | Mechanismus |
|----------|---|
| Maschine | Resonanzfrequenzen, Steifigkeit, Temperaturstabilität |
| Werkzeug | Geometrie, Unwucht, Bindungszusammensetzung |
| Prozess | Größe der Kontaktfläche (Spotgröße), Vorschub- Drehzahlverhältnis, Kinematik |

Tabelle 3.3: Ursachen Mittelfrequenter Fehler

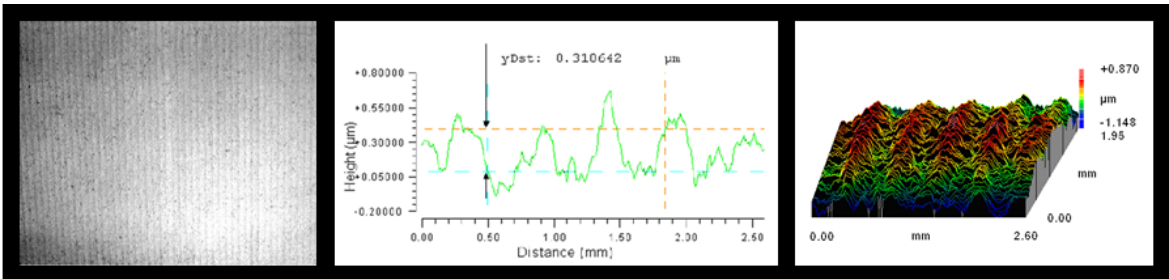


Abbildung 3.18: Bsp. interferometrische Messung geometrischer Rauheit mit 0,3 μm Amplitude auf gerasteter Probe, Werkzeugdurchmesser 100 mm, Bahnabstand 0,5mm
Fotographie der Oberfläche (links), Profilanalyse (Mitte) und Topographie (rechts)

abhängt (die wiederum durch Werkzeugzusammensetzung und Bearbeitungsparameter beeinflusst werden kann). Zusätzlich überlagern sich nur bedingt beeinflussbare Effekte, wie z.B. die Exzentrizität des Werkzeugs selbst, Kompression des Schleifbelages sowie Auslenkung des Werkzeugs durch Temperaturdrift und/oder aufgrund Werkzeugverschleiß veränderlicher Kräfte. Abbildung 3.19 und 3.20 stellen zwei Versuchsreihen mit Schleifwerkzeugen ähnlicher Kornzusammensetzung und unterschiedlichem Bindungsmaterial gegenüber. Nahezu unabhängig von Werkzeugtyp und Parametern können bei beiden Versuchsreihen ringförmige Vertiefungen und Erhebungen festgestellt werden, die auf variable Passivkräfte während der Bearbeitung zurückzuführen sind. Darüber hinaus lässt sich aus den Messungen ableiten, dass die verwendete Kunststoffbindung unter identischen Bedingungen eine geringere Tendenz zeigt, Rattermarken ähnelnden Strukturen zu erzeugen. Topographien in Abbildung 3.19 weisen generell höhere Formabweichungen und geringere Strukturen unterhalb einer Wellenlänge von 5 mm auf, verglichen mit Messungen in Abbildung 3.20. Dieses Experiment verdeutlicht den Einfluss von Werkzeug und Betriebspunkt auf die Oberflächencharakteristik geschliffener Werkstücke [VSS⁺10].

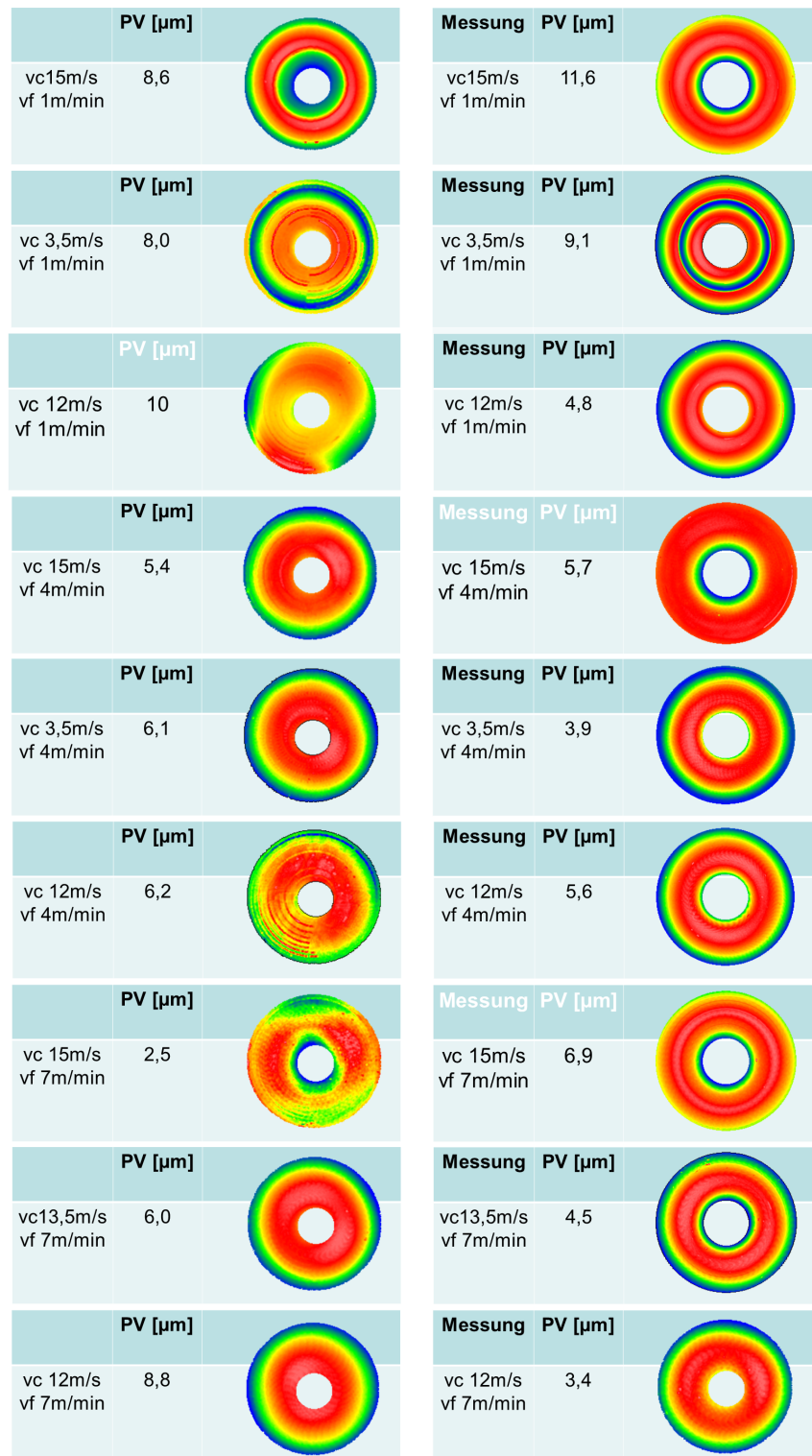


Abbildung 3.19: Topographische, taktile Messungen mit Angabe der Formabweichung PV aus einer vollfaktoriellen Versuchsreihe.

Daten und Parameter: D14 C90 Kunststoffbindung, Spiralschleifen
Bahnabstand 0.3 mm, Schnitttiefe 0.02 mm

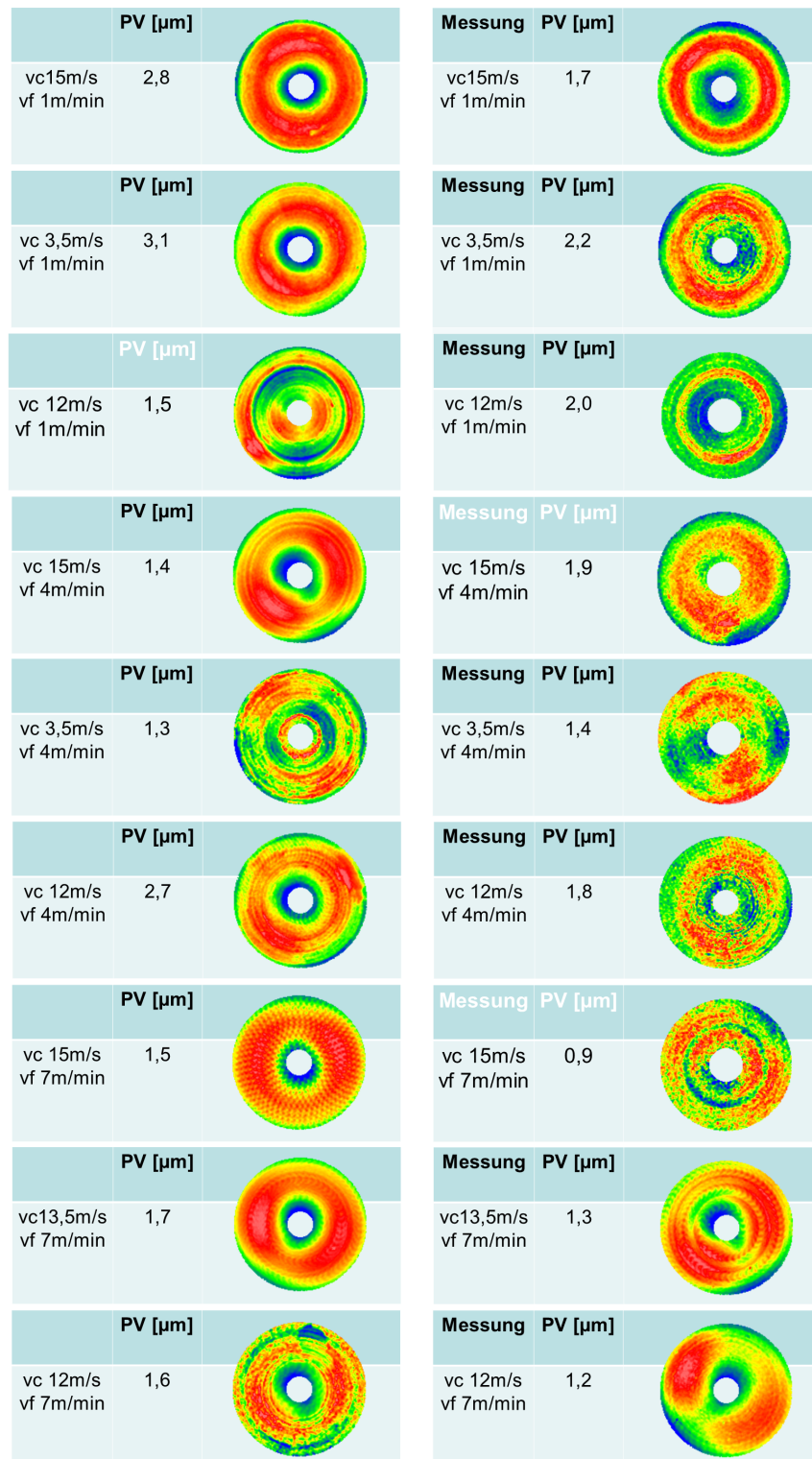


Abbildung 3.20: Topographische, taktile Messungen mit Angabe der Formabweichung PV aus einer vollfaktoriellen Versuchsreihe.
Daten und Parameter: D20 C90 Hybridbindung, Spiralschleifen, Bahnabstand 0.3 mm, Schnitttiefe 0.02 mm

3.8 Normen und Modelle

- DIN 8589-X Fertigungsverfahren Spanen
- DIN 4000-128 Schleifwerkzeuge aus gebundenem Schleifmittel mit Bohrung oder Gewinde, Abmaße von Schleifscheiben für Seiten - und Umfangsschleifen
- DIN 8589-11 Fertigungsverfahren Spanen - Teil11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, beschreibt die verschiedenen Schleifverfahren (Außen-, Innen-, Seiten-, Gleichlauf-, Gegenlaufschleifen usw.)
- DIN 58723 Optikfertigung - Diamantbesetzte Facettierwerkzeuge
Bauformen und Abmaße Facettierwerkzeuge
- DIN 58741- 1 Optikfertigung - Bezeichnungsübersicht Topfscheiben
- DIN 58741- 2 Optikfertigung - Bauformen und Abmaße Topfscheiben
- DIN 58741- 4 Optikfertigung - Bauformen und Abmaße Kombiwerkzeuge
- DIN 58741- 6,8 Optikfertigung - Ab/Anschlussmaße mehrteilige Schleifwerkzeuge
- DIN 69100 Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel, Formen, Werkstoffe
- DIN 69800 Schleifkörper mit Schleifbelag aus Diamant oder Bornitrid
- DIN 69805-830 Verschiedene Schleifwerkzeuge mit Belag aus Diamant oder Bornitrid
- ISO 525 Klassifizierung konv. Schleifscheiben (nicht Diamant und Bornitrid)
- DIN ISO 12844 Schleifbarkeit von opt. Rohglas mit Diamant-Pellets, Prüfverfahren
- ISO R 565 1972 Norm zur Angabe von Diamantkorngrößen
- DIN 848 06/1965 Norm zur Angabe von Diamantkorngrößen

Tabelle 3.4: Normen Schleifen

In der Feinoptik werden überwiegend, aber nicht ausschließlich Werkzeuge mit Diamantkörnern verwendet. Tabelle 3.4 listet die relevanten Normen neben einer ungefähren Inhaltsangabe auf. Die aufgelisteten Normen beschreiben überwiegend die verschiedenen Verfahren, diverse Bauformen von Werkzeugen und Diamantkorngrößen.

Besonders hervorzuheben ist die DIN ISO 12844. Sie beschreibt ein Verfahren zur Ermittlung der Schleifbarkeit von Rohglas. Materialangaben gemäß dieser Norm finden sich bei nahezu allen Materialdatenblättern von Herstellern und Lieferanten von optischem Rohglas. Die Norm beschreibt ein druckgesteuertes Schleifverfahren, bei dem Proben des zu prüfenden Werkstoffs und Proben eines Referenzglases unter identischen Bedingungen zerspannt werden. Das Verhältnis des Materialabtrags von Referenzglas und zu prüfendem Werkstoff wird in eine sog. Schleifbarkeitsklasse nach DIN ISO

12844 (HG) überführt. Wird bei diesem Verfahren ein sehr viel höherer Materialabtrag als beim Referenzglas erreicht, kann maximal eine Schleifbarkeitsklasse 6 angegeben werden. Geringere Materialabträge führen entsprechend zur Angabe einer niedrigeren Schleifbarkeitsklasse (minimal 1).

Eine Norm zur quantitativen Ermittlung und Dokumentation der Abtragsleistung von Schleifwerkzeugen existiert nach aktuellem Stand der Technik nicht. Dies schlägt sich in den Bezeichnungen marktüblicher Optikwerkzeuge nieder (vgl. Kapitel 3.5).

Für die rechnerische Auslegung von Zerspanungsprozessen existieren derzeit verschiedene Modelle, die den Ansatz der geometrischen Beschreibung von Schleifwerkzeugen verfolgen. Die Berechnung gestaltet sich damit ähnlich wie bei einem Fräsprozess, wobei eine sog. mittlere Spanungsdicke angegeben wird [MTI00], [DT11]. Bei der Spanungsdicke handelt es sich beim Schleifen um eine theoretische Größe, die sich aus Prozess- und Werkzeugparametern errechnet. Berücksichtigt werden Größen wie Werkzeuggeometrie, Kontaktfläche, Kornkonzentration, Kornform, Schnitttiefe, Zustellung, Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit.

[MTI00] charakterisiert Schleifprozesse über eine Uncut Chip Thickness (h_{cu}) bzw. die Korneindringtiefe (Gleichung 3.4):

$$h_{cu} = \sqrt{\frac{v_f}{v_c} \cdot \frac{l_g}{N \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{d_e}}} \quad (3.4)$$

für $h_{cu} \ll a_e$

v_c

Vorschubgeschwindigkeit in $\frac{mm}{min}$ (v_f)

Arbeitseingriff in mm (a_e)

äquivalenter Werkzeugdurchmesser (d_e)

Anzahl aktiver Schneidkörner (N)

Kornformfaktor (λ)

Kontaktlänge des Werkzeugs in mm (l_g)

Diese Modelle setzen voraus, dass die geometrischen Eigenschaften des Werkzeugs bekannt sind und sich während der Bearbeitung nicht verändern. Dem entgegen steht die These von sich durch Verschleiß selbstschärfenden Schleifwerkzeugen und solchen, die durch Abricht- und Schärfprozesse regelmäßig konditioniert werden müssen [DT11].

Ein praxisgerechtes Modell sollte Eigenschaften des Schleifwerkzeugs berücksichtigen. Die Zusammensetzung eines Werkzeugs lässt sich beliebig an die Bedürfnisse des Anwenders anpassen. Das Know-How für solche kundenspezifischen Produkte liegt beim Hersteller und ist nicht frei zugänglich. Daten hinsichtlich der Zusammensetzung des eingesetzten Werkzeugs sind nur eingeschränkt verfügbar, Angaben zur Zerspanungsleistung sind praktisch nicht verfügbar. Die zugänglichen Daten beschränken sich auf die geometrischen Abmessungen des Werkzeugs, eine Angabe der Größe des größten enthaltenen Kornes und des Kornmaterials, sowie eine Klassifikation des Bindungstyps. Außer den dargelegten Modellen zur ungefähren Bestimmung einer theoretischen Spannungsdicke existiert keine quantitative Korrelation zwischen Werkzeugzusammensetzung und Prozessergebnis.

Modelle liefern deshalb für den Anwender einen Ausgangspunkt zur Orientierung, sie können die experimentelle Prozessoptimierung am Produkt jedoch nicht ersetzen.

Um einen Schleifprozess auszulegen, kann der Anwender auf Daten bzgl. Anlagen- und Werkzeugkonfiguration zurückgreifen. Eine Angabe zu Prozessergebnis (Prozesszeit, Standzeit, Qualität) und Einstellparametern gibt es im Vorfeld nicht. Diese Daten werden derzeit von Anwendern experimentell am Produkt empirisch ermittelt.

Damit ist eine elementare Anforderung an industrielle Fertigungsprozesse nicht erfüllt:

Sie sind nicht deterministisch[Ric11].

Daher schlägt die vorliegende Arbeit im Kapitel 5 einen neuen Standardtest zur Qualifizierung von Schleifwerkzeugen für die optische Industrie vor. Das Verfahren beruht auf der Ermittlung von Werkzeugkennlinien und bietet eine ideale Grundlage zur Entwicklung einer Norm für die Ermittlung und Definition von Werkzeugeigenschaften. Die so gewonnenen Informationen eignen sich des Weiteren zur Verfahrenseinrichtung und Optimierung.

4 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Analyse von CNC-Schleifverfahren und die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Prozessfenstern. Die Methodik basiert auf der Erstellung von Werkzeugkennlinien, mit deren Hilfe nachfolgend Prozesse und Prozessketten hinsichtlich Stückkosten und Ausbeute ausgereizt werden können. Zur technologischen Realisierung eines spröden Zerspanungsvorgangs stehen verschiedene Anlagentypen zur Verfügung, die grundsätzlich kraft- oder positionsgesteuert werden. Während Daten zur Spezifikation moderner Anlagentechnologie (Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Steifigkeit, Leistung) meist problemlos erhältlich sind, stehen diese für Schleifwerkzeuge meist nicht zur Verfügung oder variieren von Hersteller zu Hersteller sehr stark. Diese Arbeit beschäftigt sich damit, statt einer anlagenorientierten Fertigung eine prozessorientierte Fertigung zu ermöglichen. Herzustellende Produkte werden derzeit nach Erfahrungswerten einzelnen Anlagen aus einem meist bereits bestehenden Maschinenpark zugeordnet, auf denen dann experimentell und iterativ der Herstellprozess entwickelt und optimiert wird. Eine prozessorientierte Fertigungsplanung richtet sich nach den technologischen Anforderungen für den Prozess selbst und definiert daraus die zu verwendende Anlagentechnik. Damit kann eine experimentelle Prozessentwicklung, die für jedes neue Produkt jedes Mal individuell und mit mehr oder minder ungewissem Ergebnis durchgeführt werden muss, völlig entfallen. Somit kann für ein Produkt aus einer Reihe von Schleifprozessen gewählt werden, bei denen die vorhandene Werkzeug- und Anlagentechnik die Mindestanforderungen erfüllt. Um eine Fertigung nach diesem Prinzip zu planen, sind Kenntnisse über den zu realisierenden Prozess erforderlich.

Die vorliegende Arbeit präsentiert eine neue Methode: gPVA. Sie ermöglicht eine Fertigungsplanung für CNC-Schleifverfahren. Die primäre Zielsetzung ist damit die Entwicklung einer Werkzeuggeometrie und anlagenunabhängigen Methodik zur Beschreibung von Sprödschleifprozessen für Glaswerkstoffe. Sekundäre Zielsetzung ist die Bewertung der Methodik hinsichtlich Genauigkeit und Anwendbarkeit. Sie wird im Folgenden genutzt um weitere, relevante Einflussgrößen zu identifizieren um damit

Prozesse gezielt zu optimieren. Für die Anlagen- und Werkzeuggeometrie unabhängige Prozessbeschreibung wird die Prestontheorie herangezogen. Die „Preston Theory“, benannt nach ihrem Erfinder Frank W. Preston, beinhaltet eine Gleichung zur Beschreibung des Abtragsverhaltens beim Polieren von Glas [Pre27]. Sie dient in dieser Arbeit als Ausgangspunkt für die quantitative Beschreibung von Schleifprozessen.

Die Untersuchung der erarbeiteten gPVA-Methode, die Identifizierung der relevanten Einflussgrößen und deren Flowchart sowie die gezielte Optimierung erfolgen unter Verwendung der sog. 3 Waggon-Methode. Sie dient zur systematischen Identifizierung von Einflussgrößen bei Prozessen in der Optikfertigung [Fae16]. Dieses Vorgehen wurde entwickelt, um in einer Fertigungsumgebung mit entsprechend vielen Einflussfaktoren systematische Optimierung bei laufender Produktion zu betreiben. Es besteht im Wesentlichen aus 3 Punkten:

- Waggon 1: Freeze

Die tatsächliche Reproduzierbarkeit eines Prozesses in einer Fertigungsumgebung ist wegen der Vielzahl beteiligter Technologien und Personen, im regulären Betrieb i.d.R. nicht zuverlässig messbar. Darum besteht der erste Schritt aus Fixierung und Dokumentation aller an der Fertigung beteiligten Schritte und Parameter bevor eine Referenzserie gefertigt wird. Neben der Dokumentation der relevanten Parameter, müssen diese durch geeignete Maßnahmen im Prozess überwacht werden. An der so gefertigten Serie wird die Qualitätsschwankung bestimmt und als Ausgangssituation definiert.

- Waggon 2: Optimize

Mit den in Waggon 1 geschaffenen Rahmenbedingungen kann nun eine Optimierung nach dem One Factor at A Time (OFAT)-Prinzip durchgeführt werden. Die Ergebnisse dienen dazu, einfache Wechselwirkungen zu identifizieren und ein Flussdiagramm zu erstellen, das Parameter nach ihrer Relevanz aufschlüsselt.

- Waggon 3: Verify

Nachdem die relevanten Parameter und deren Wechselwirkungen in Waggon 2 identifiziert wurden, kann nun eine Optimierung nach dem entwickelten Flussdiagramm folgen. Die Ergebnisse werden anhand einer weiteren Serie verifiziert. Die Serie wird nach demselben Prinzip wie in Waggon 1, jedoch mit optimierten Parametern durchgeführt.

5 Grinding Process Validation Approach - gPVA

Belege über die Herstellung von Optiken reichen zurück bis ins Altertum [SS87], wie die Funde der 1400 vor Christus hergestellten Minoischen Linsen auf Kreta belegen. Um ca. 2000 v. Chr. wurden z.B. polierte Linsen als Lesehilfe verwendet. Diese Optiken wurden damals wahrscheinlich ausschließlich in Handarbeit hergestellt. Auch heute sind Feinoptiker in der Lage, einfache Linsen mit hoher Präzision in Handarbeit herzustellen. Die dafür erforderlichen Fertigkeiten zu erlernen ist ein langwieriger Prozess. Dabei wird häufig berichtet, dass die durchgeführten Schritte mehr aus einer Art Intuition heraus, als nach streng logischen Gesichtspunkten gewählt werden. Im Zuge der Industrialisierung übertrug man Elemente dieser Fertigkeiten zunehmend an teil- und schließlich vollautomatisierte Bearbeitungsmaschinen. Qualität und Genauigkeit wurden auf diese Art und Weise kontinuierlich verbessert. Während sich die Werkzeuge zur Realisierung der betreffenden Prozesse aus historischer Sicht sehr gewandelt haben, sind die Prozesse in gewisser Weise immer noch sehr ähnlich. Beim Schleifen werden große Teile des Prozessdesigns nach wie vor intuitiv und aus Erfahrungswerten heraus festgelegt. Um die Innovationskurve fortzuführen ist eine gedankliche Trennung von Anlagentechnologie und Prozess bzw. Mechanismus notwendig. Deshalb wird im Folgenden ein Werkzeug zur systematischen Analyse und Optimierung von Schleifprozessen vorgestellt: gPVA [COR17]

5.1 Funktionsprinzip gPVA

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode „grinding Process Validation Approach“ dient zur Einrichtung und Optimierung von „State of the art“ Schleifprozessen sprödharter Materialien. Sie beruht auf der Preston Theory [Pre27], welche ursprünglich entwickelt wurde, um einen linearen Zusammenhang zwischen Abtrag, Relativgeschwindigkeit und Druck beim Polieren von Flachglas zu beschreiben. Sie findet jedoch auch bei Läpp- (kraftgesteuert) und Schleifprozessen (weggesteuert) Anwendung und dient hier als

Ausgangspunkt[VRRS15](vgl. Kapitel 3.3).

Die Verwendung der Prestongleichung, um positionsgesteuerte Prozesse zu beschreiben, ist möglich, weil die betreffenden CNC-Schleifanlagen zwar eine sehr hohe, aber dennoch endliche Steifigkeit besitzen. Damit können auch weggesteuerte Prozesse in kraftgesteuerte überführt werden.

Wie eingangs beschrieben, beruht der Prozess bei allen Sprödschleifverfahren auf dem Prinzip der Ausbildung und Agglomeration von Rissen, so dass kleine und kleinste Materialteilchen vom Werkstück separiert werden. Die Summe dieser abgetragenen Späne stellt den Materialabtrag, oder auch das Zeitspanvolumen dar. Abbildung 5.1 illustriert die Bedingungen in der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück. Unabhängig vom Verfahren lassen sich die Bedingungen in der Kontaktzone von Werk-

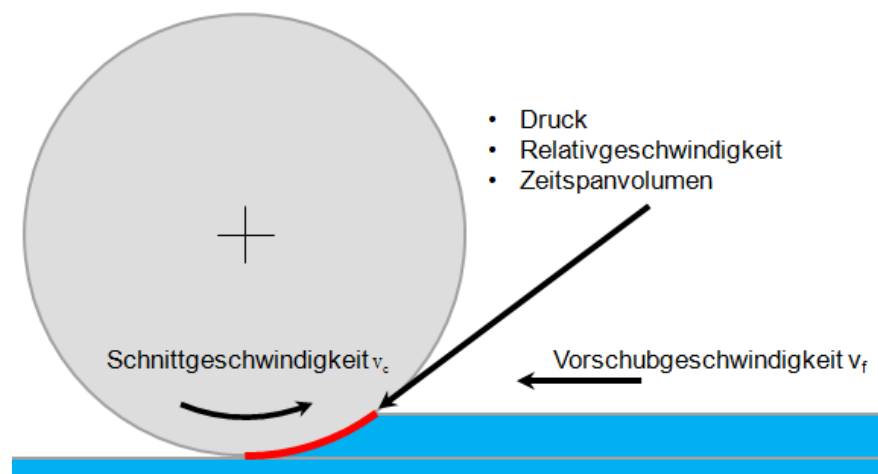


Abbildung 5.1: Bedingungen im Schleifspalt

zeug und Werkstück durch Druck, Relativgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit beschreiben [VRRS15].

$$MRR = k * P * v_c \quad (5.1)$$

Die Theorie besagt, dass innerhalb eines Prozessfensters Druck, Relativgeschwindigkeit und Abtragsleistung proportional sind (siehe Gleichung 5.1). In diesem Fall können die veränderlichen Größen wie z.B. Werkzeug, Kühlschmiermittel, Material in einer Konstante „k“, dem Prestonkoeffizienten, zusammengefasst werden. Dem Umkehrschluss zu Folge brechen außerhalb des Prozessfensters die proportionalen Abhängigkeiten zusammen, da die eingebrachten Energien nicht mehr zum Abtrag genutzt werden

(siehe auch Kapitel 3.3, Abbildung 3.7). Dieser Effekt wird für gPVA genutzt. Die Prestongleichung wurde für Verfahren entwickelt, bei denen der Druck oder Last direkt einstellbar sind, wobei die Abtragsleistung gemessen wird. Bei CNC-gesteuerten Verfahren wird die MRR direkt eingestellt, so dass der dabei entstehende Druck gemessen werden muss, um die Gleichung anzuwenden. Die MRR errechnet sich bei CNC-Schleifprozessen aus:

- Werkzeuggeometrie
- Verfahrenskinematik
- Schnitttiefe
- Zustellung
- Vorschubgeschwindigkeit
- Schnittgeschwindigkeit

Um die MMR zu bestimmen, wird die Gleichung wie folgt angepasst:

$$MRR = \frac{A_f * v_f}{A_c} = k * v_c * P \quad (5.2)$$

Zugeführter Materialquerschnitt in mm^2 (A_f)
Gesamte Kontaktfläche in mm^2 (A_c)

Um die bei definierten MRR entstehenden Drücke zu ermitteln, wird ein Prüflauf auf einer mit einem Dynamometer ausgestatteten CNC-Schleifanlage durchgeführt (siehe Abbildung 5.2).

Wesentliche Wechselwirkungen in Schleifprozessen finden zwischen den einzustellenden Bearbeitungsparametern und dadurch im Prozess beeinflussten Größen statt. Wie aus der Prestongleichung ersichtlich, handelt es sich bei den kritischen Größen im Prozess um Druck und Relativgeschwindigkeit, die eine definierte Abtragsrate hervorrufen. Bei weggesteuerten CNC-Schleifprozessen erfolgt jedoch eine direkte Vorgabe der Abtragsrate, die in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen zu einem definierten Druckniveau führt. Damit ist die Abtragsrate für den eigentlichen Prozess die wesentliche, kritische (indirekte) Größe, die es zu kontrollieren gilt. Sie wird von den direkt einzustellenden Parametern beeinflusst, die beim Prozessdesign festgelegt werden

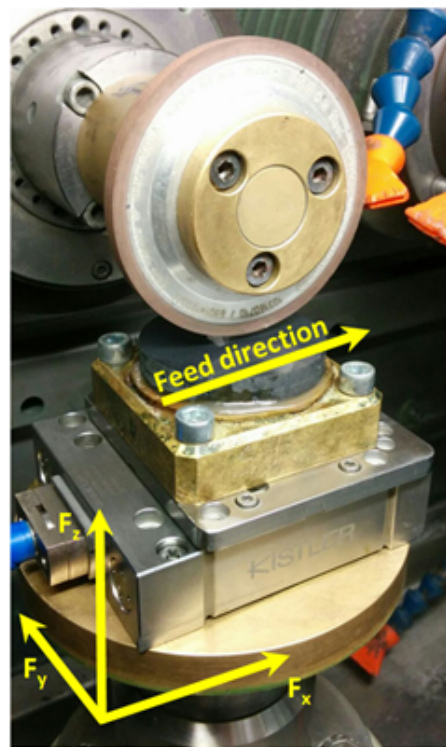


Abbildung 5.2: Versuchsaufbau gPVA

(vgl. Abbildung 5.3). Weitere kritische indirekte Größen sind der erzeugte Druck und die dabei entstehende Passivkraft. Steifigkeit von Aufspannung und Anlage sowie die Festigkeit des Werkstoffes sind endlich. Daraus leitet sich eine maximal zulässige Last ab, die bei der Prozessentwicklung berücksichtigt werden muss. Abbildung 5.4 fasst die notwendigen Schritte zur Durchführung von gPVA zusammen. Wie in Waggon 1 (siehe auch Kapitel 4) beschrieben, werden zur Ermittlung von gPVA-Kennlinien Kühlschmiermittel, Werkzeug, Material und Schnittgeschwindigkeit eingefroren. Hierbei werden zu testende Schnittgeschwindigkeiten ausgewählt, idealerweise im mittleren, oberen und unteren Bereich des v_c -Spektrums, in dem später gefertigt werden soll. Die Spanne realisierbarer Schnittgeschwindigkeiten hängt von Werkzeug und Anlage ab und muss für die jeweilige Fertigungsumgebung individuell gewählt werden. Im Anschluss wird für jede Schnittgeschwindigkeit ein Prüflauf durchgeführt und die Werkzeugkennlinie ermittelt. Hierbei steigt im Prozessfenster die Abtragsrate linear mit dem Druck an (Gleichung 5.2). Die Auswahl eines Betriebspunktes (also der entsprechende MRR- und P-Wert auf der Kennlinie) erfolgt so, dass möglichst hohe MRR und v_c und damit ein hohes Zeitspanvolumen erreicht werden. Anschließend werden die Maschineneinstellparameter, wie z.B. Drehzahl und Vorschub, aus den MRR und P Werten des Betriebspunktes gemäß Gleichung 5.2 ermittelt (siehe Abbildung 5.4).

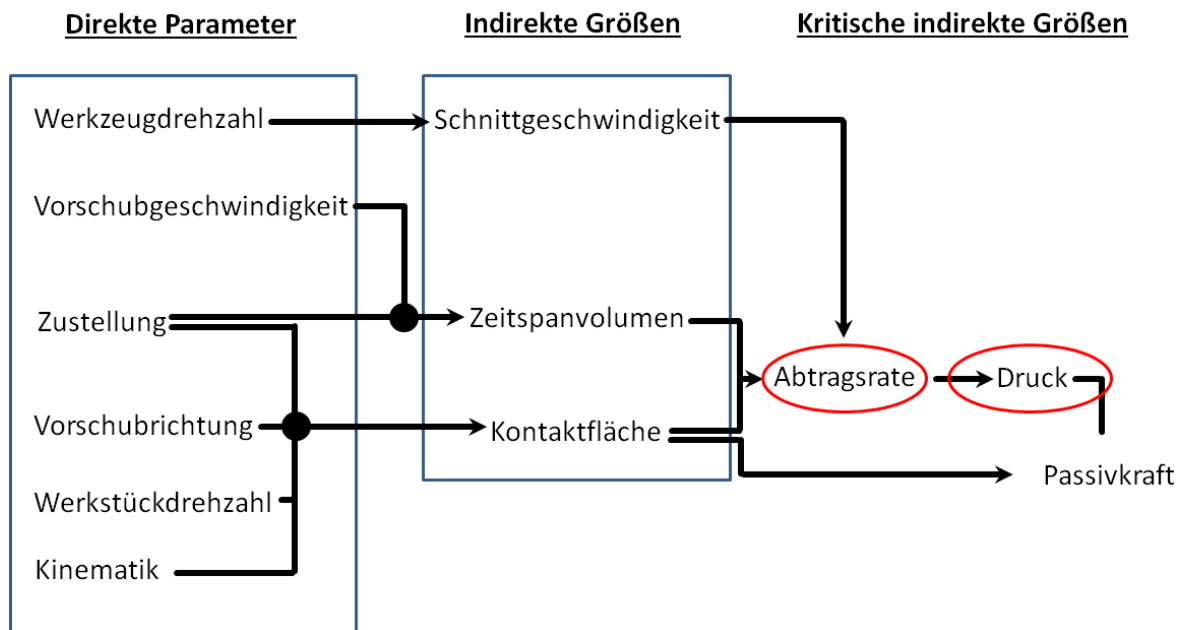


Abbildung 5.3: Flussdiagramm Wechselwirkungen Schleifen, das den Zusammenhang zwischen Parametern nach Preston ($MRR(P)$) und den CNC-Einstellparametern (Drehzahl, Vorschub etc.) aufzeigt

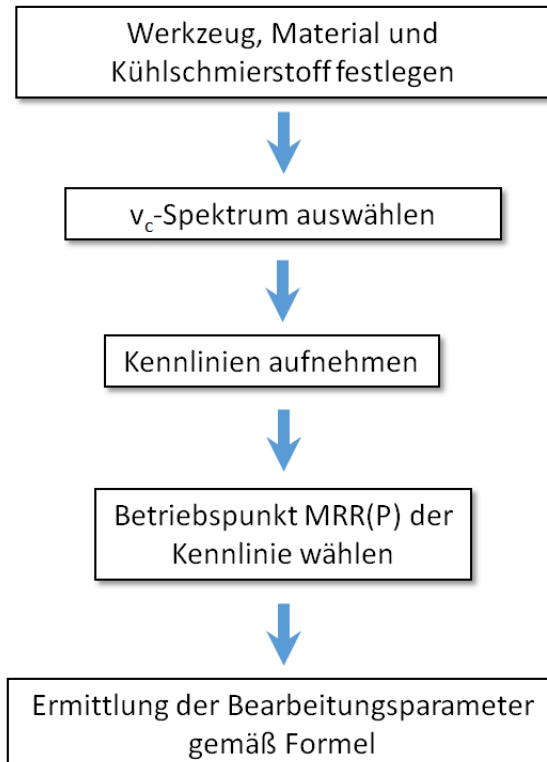


Abbildung 5.4: Vorgehen gPVA, siehe auch Abbildung 5.3 Formel 5.2

Während eines Testlaufs wird die MRR über die Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit in definierten Intervallen erhöht und parallel die Passivkraft bei der Zerspanung aufgezeichnet. Innerhalb des Prozessfensters steigt die Passivkraft proportional zur Vorschubgeschwindigkeit (für v_c =konstant) an (siehe Gleichung 5.2). Ist das obere Ende des Prozessfensters erreicht, steigt die Kraft überproportional an. Abhängig vom Werkzeugtyp kann ein sprunghafter Anstieg des Werkzeugverschleißes beobachtet werden. Die zusätzlich eingebrachte Energie führt dann nicht mehr ausschließlich zu einer Erhöhung des Zeitspanvolumens (vgl. Abbildung 5.5 links). Trägt man in einem Diagramm MRR über P (Gleichung 5.2) auf, erhält man eine Werkzeuggeometrie und anlagen/verfahrensunabhängige Darstellung des Prozessfensters. Das Prozessfenster endet, wenn Druck und Abtrag nicht mehr proportional verlaufen. Dieser „Überlastbereich“ ist im Diagramm entsprechend markiert (vgl. Abbildung 5.5 rechts). Abbildung 5.6 zeigt eine typische gPVA Kennlinie, die durch die lineare Abhängigkeit $MRR(P)$ bei konstantem v_c gekennzeichnet ist. Ein weiterer Indikator für das obere Ende des Prozessfensters

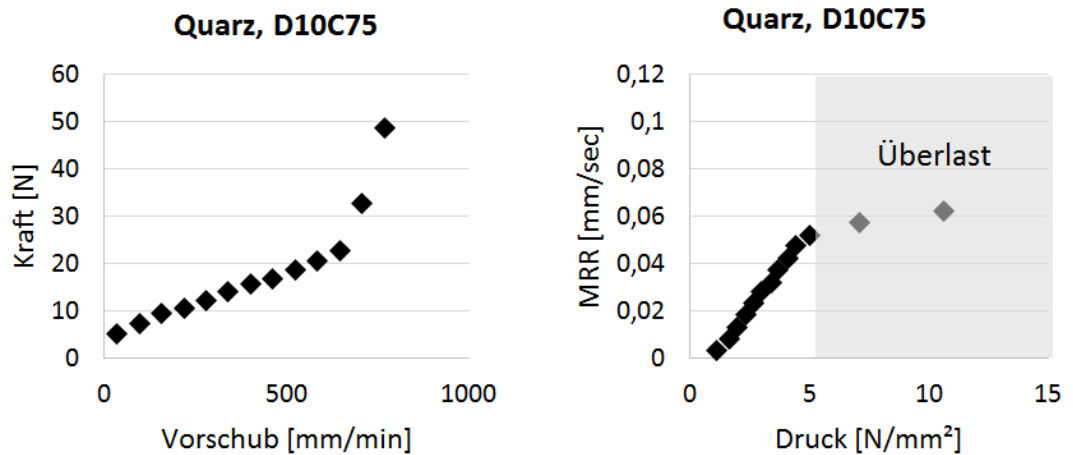


Abbildung 5.5: Fallbeispiel gPVA-Prozesstest, Kraftverlauf (links) und typische gPVA-Kennlinie (rechts) für Quarz bei v_c 16 m/sec

ist die zweite Ableitung der Druck-Abtrags-Kennlinie:

$$MRR(P)'' = \frac{\partial^2 MRR}{(\partial P)^2} \quad (5.3)$$

Ändert sich die Steigung um mehr als 100 % (zweite Ableitung >1) deutet dies auf die obere Prozessfenstergrenze hin. Für das angegebene Beispiel (Abbildung 5.6 und 5.7) endet das Prozessfenster bei $5 \frac{N}{mm^2}$.

Außerhalb des Prozessfensters wird die Energie nicht mehr in den Abtragsprozess eingebracht und es können unerwünschte Effekte entstehen (Rattermarken, Schleifbrand). MRR-Kurven von Prüfläufen mit verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten sind nicht direkt vergleichbar, da bei dieser Versuchsanordnung eine unabhängige Einstellung von MRR und Schnittgeschwindigkeit erfolgt. Eine höhere Schnittgeschwindigkeit bei sonst identischen Bedingungen führt hier zu einem niedrigeren Druckniveau. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden MRR(P)-Kurven immer für eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 1 \frac{m}{sec}$ konvertiert, so dass sie direkt verglichen werden können. Aus

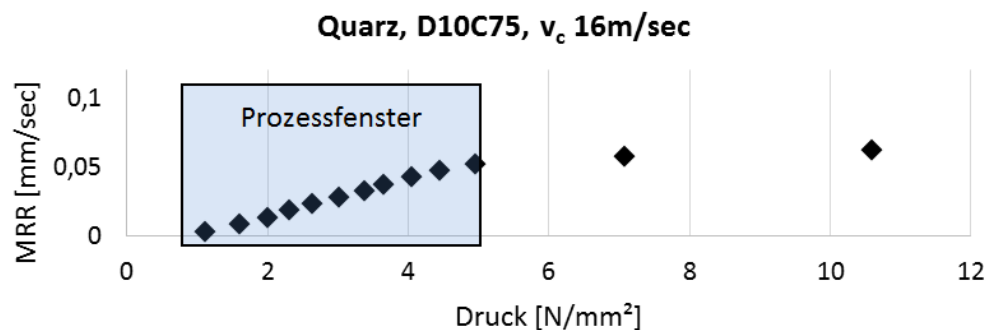


Abbildung 5.6: Typische gPVA-Kennlinie mit Prozessfenster

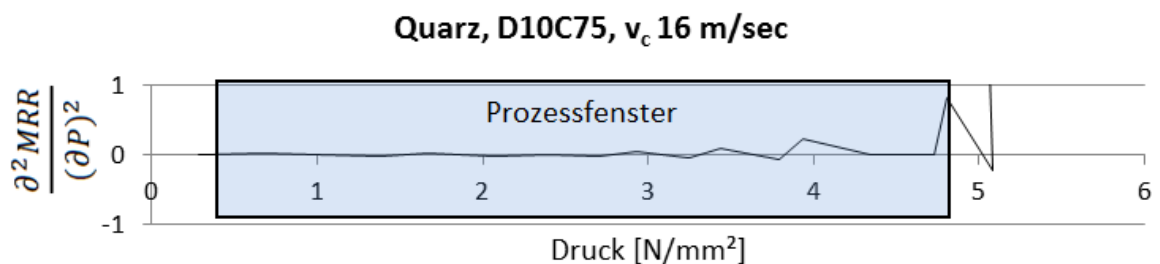


Abbildung 5.7: MRR(P)'' einer typischen gPVA-Kennlinie, der Ausschlag der Kennlinie zeigt das Ende des Kennfeldes an.

der Werkzeugkennlinie lässt sich der optimale Betriebspunkt für die getestete Konfiguration entnehmen (Waggon 2). Da das gPVA-Kennfeld auf MRR(P) beruht, können die Ergebnisse auf nahezu jeden beliebigen Prozess mit ähnlichen Rahmenbedingungen übertragen werden. Die Größe der Kontaktfläche errechnet sich dabei aus den geometrischen Verhältnissen, die durch Kinematik und Werkzeugabmessungen beeinflusst werden. Die Zielsetzung bei der Produktion ist ein möglichst hoher Ausstoß. Gemäß dem

Beispielkennfeld in Abbildung 5.6 sollte die MRR deshalb möglichst hoch gewählt werden, wobei ein Sicherheitsabstand zum oberen Ende des Prozessfensters empfohlen wird.

Ein Betriebspunkt nach gPVA-Kennfeld stellt sicher, dass die erforderliche Last zur Selbstschärfung erreicht wird. Eine zu geringe Belastung des Werkzeugs kann zu duktilem Materialabtrag, zum Verglasen des Werkzeugs (vgl. Abbildung 5.17) und zu schwankenden Passivkräften führen (dies wird in Kapitel 8 analysiert). Dieser Effekt schlägt sich sowohl auf den Verlauf der erzeugten Rauheit als auch auf die Oberflächenqualität beim Flächenschleifen nieder.

gPVA ermöglicht die verfahrensunabhängige Messung und Dokumentation der Abtragsleistung von Schleifwerkzeugen. Dies ermöglicht eine direkte Aussage über die zu erwartende Produktivität bei definierten Rahmenbedingungen. Dies wird im Kapitel 7 im Detail diskutiert.

gPVA ermöglicht die direkte Bestimmung von Prozessfenstern für verschiedene Schleifwerkzeuge sowie die Definition der Anforderungen an die Anlagentechnik. Darüber hinaus kann gPVA genutzt werden, um die Eignung von Schleifwerkzeugen für bestimmte Applikationen direkt miteinander zu vergleichen.

5.2 Genauigkeit

Hinsichtlich Genauigkeit müssen Messeinrichtung, Positioniereinrichtung und Werkzeug berücksichtigt werden. Die Genauigkeit der Kraftmessung wird vom Hersteller für den entsprechenden Messbereich bis 100 N mit rund $\pm 0,5$ N angegeben. Die Berechnung der Abtragsrate erfolgt ausschließlich über Einstellparameter und Kinematik. Die tatsächliche Schnitttiefe wird durch die Steifigkeit von Schleifanlage und Aufspannung und die Rundlaufgenauigkeit des Werkzeugs beeinflusst. Ein Offsetfehler wird durch unmittelbares Planschleifen vor dem eigentlichen Versuch auf die Positioniergenauigkeit der Anlage reduziert.

Die Steifigkeit des Prüfsystems beträgt rund $4 \mu\text{m}$ pro N (experimentell ermittelt). Typische Prüfkraft für gPVA-Kurven liegen bei 15-20 N. Die zu erwartende Abweichung durch einen Positionierungsfehler in Z-Richtung, aufgrund elastischer Verformung, liegt damit bei $20 \mu\text{m}$ am Versuchsbeginn und bei $80 \mu\text{m}$ am Versuchsende.

Abtragsrate und Kräfte werden anhand eines Plan-Längsschleifprozesses mit folgenden Parametern ermittelt:

$$\begin{aligned} a_e &= 0,7 \text{ mm} \\ \text{Schnittbreite in mm } (a_p) &= 0,5 \text{ mm} \\ \text{Werkzeugdrehzahl} &= 2500 \text{ Umdrehungen pro Minute (Upm)} \\ \text{Übliche Werkzeugdurchmesser} &= 100\text{-}120 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tabelle 5.1: Parameter Plan-Längsschleifprozess Versuchslauf

$$MRR = \frac{f_r * v_f}{l_g * v_c} \quad (5.4)$$

$$P = \frac{F}{a_p * l_g} \quad (5.5)$$

$$l_g = \sqrt{2 * f_r * R} \quad (5.6)$$

$$(5.7)$$

Wie aus Formel 5.4 ersichtlich, ist die tatsächliche Schnitttiefe die kritischste Einflussgröße und wird daher näher betrachtet. Aufgrund der Anlagensteifigkeit errechnet sich ein Maximalfehler von $-80 \mu\text{m}$. Die tatsächliche Schnitttiefe bewegt sich damit im Bereich von $0,7 \text{ mm}$ bis $0,62 \text{ mm}$. Die tatsächlich erzeugte Abtragsrate bei $v_f \text{ max}$ von $1500 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ liegt damit in einem Bereich von $0,114 - 0,121 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (siehe Abbildung 5.8). Abbildung 5.9 zeigt ein Fehlerbalkendiagramm für einen typischen Feinschleifprozess,

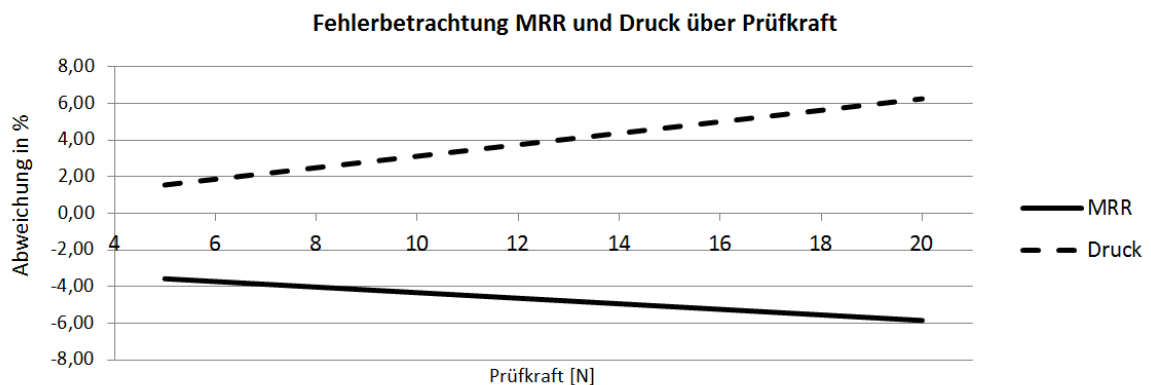


Abbildung 5.8: Fehlerbetrachtung MRR und Druck über Prüfkraft

welches die Reproduzierbarkeit des Verfahrens anhand einer Versuchsreihe widerspiegelt. Sie basiert auf drei Wiederholungen eines Prüflaufs mit einem Kugelsegmentwerkzeug D15 C50, Bronzebindung und Quarzglas. Das Werkzeug wurde zwischen den Versuchen nicht abgerichtet. Die Höhe der Fehlerbalken entspricht $2 \times \text{Standardabweichung } (\sigma)$.

Auf Basis der verwendeten Daten ist zu erwarten, dass 95 % aller Messungen innerhalb des dargestellten Intervalls liegen. Die zu erwartende Abweichung liegt damit bei $\pm 112\%$ bei Drücken um $0,8 \frac{N}{mm^2}$ und $\pm 12\%$ bei Drücken um $4 \frac{N}{mm^2}$.

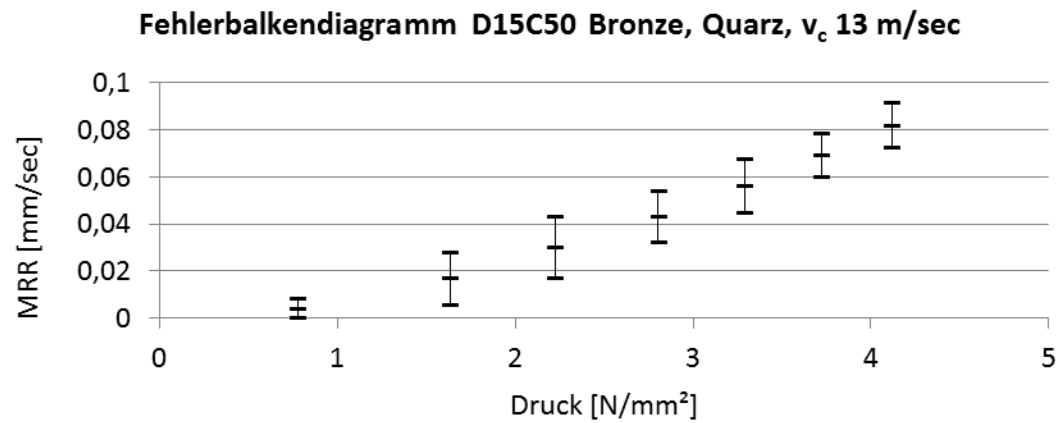


Abbildung 5.9: gPVA Fehlerbalkendiagramm, D15 C50, Quarz, $v_c 13 \frac{m}{sec}$

5.3 Einflussgrößen

5.3.1 Schnittgeschwindigkeit

Um den Einfluss variabler Schnittgeschwindigkeiten zu testen, wurden Material, Werkstoff, Kühlschmiermittel und Bearbeitungsparameter fixiert. Es wurden mehrere Versuche mit verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten durchgeführt. Getestet wurden v_c 13, 21 und 30 $\frac{m}{sec}$, um die Spanne am häufigsten verwendeter Schnittgeschwindigkeiten im Bereich Optikfertigung abzudecken. Die Messungen zeigen, dass höhere Schnittgeschwindigkeiten bei identischen Abtragsraten generell zu höheren Kraft- bzw. Druckniveaus führen. Gleichzeitig fallen MRR und Maximaldruck mit zunehmendem v_c ab. So wurden bei v_c 13 $\frac{m}{sec}$ noch 0,08 $\frac{mm}{sec}$ bei 4,8 $\frac{N}{mm^2}$ erzielt, während bei v_c 30 $\frac{m}{sec}$ nur noch 0,03 $\frac{mm}{sec}$ Abtragsrate bei 3,6 $\frac{N}{mm^2}$ gemessen wurden (vgl. Abbildung 5.10). Die vertikale Linie am Ende der Kennlinie repräsentiert den Fehlerbereich.

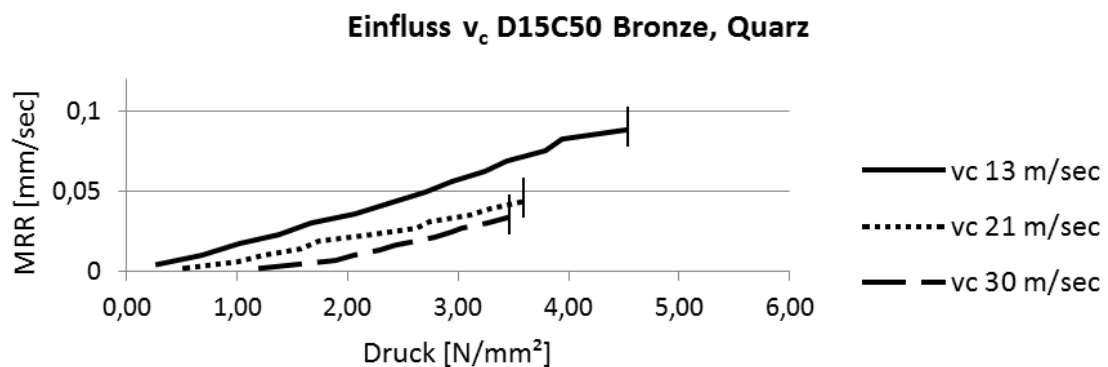


Abbildung 5.10: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die gPVA-Kennlinie, D15 C50 Bronzebindung auf Quarz

5.3.2 Kühlschmiermittel

Um den Einfluss verschiedener Kühlschmiermittel (KSM) zu untersuchen, wurden Material, Werkstoff, Schnittgeschwindigkeit und Bearbeitungsparameter fixiert. Es wurden mehrere Versuche mit verschiedenen wassermischbaren Kühlschmiermittelkonzentraten durchgeführt, die im Folgenden als Konzentrat A und Konzentrat B bezeichnet werden. Konzentrat A wurde explizit für die Zerspanung von Glas entwickelt. Konzentrat B wurde zum universellen Einsatz für Fräs- und Schleifprozesse entwickelt. Entsprechend Herstellerangabe wird KSM mit Konzentrat B mit einem geringeren Wasseranteil angemischt als KSM mit Konzentrat A. Wie in Abbildung 5.11 zu sehen, sind deutliche Unterschiede bei Abtragsleistung und Druckniveau messbar. Während mit Kühlschmiermittel A eine MRR von rund $0,055 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ bei $\frac{N}{\text{mm}^2}$ gemessen wurde, waren es bei Kühlschmiermittel B lediglich $0,025 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ bei $1,8 \frac{N}{\text{mm}^2}$. Die Abtragsleistung hat sich bei Einsatz von KSM B in etwa auf ein Drittel reduziert, verglichen mit KSM A.

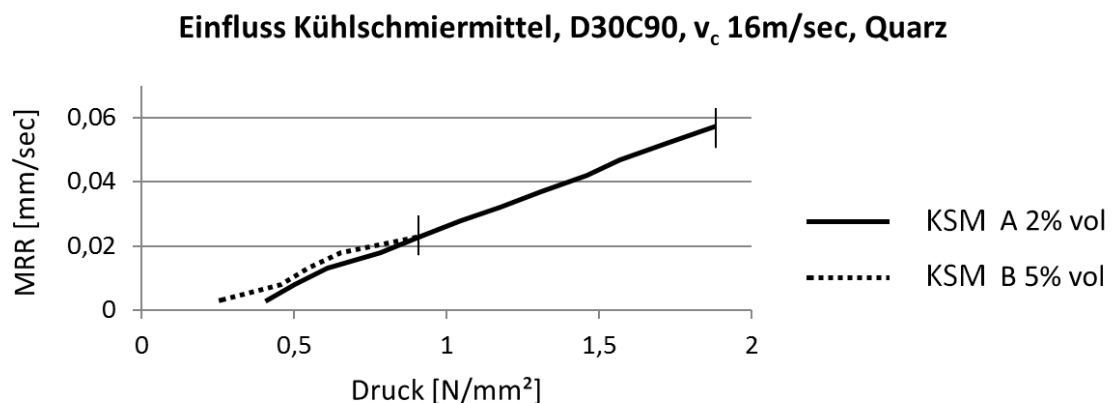


Abbildung 5.11: Einfluss des Kühlschmiermittels auf die gPVA-Kennlinie

5.3.3 Werkstoff

Wie bereits in Kapitel 3.3 Abbildung 3.8 gezeigt, hat das zu zerspanende Material einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf von Druck und Abtragsrate, bei ansonsten gleichbleibenden Parametern bzgl. Kühlschmierstoff, Werkstoff, Schnittgeschwindigkeit und Maschineneinstellungen. Die Abtragsleistung wurde an SF57 (HG 1, Knoop Härte nach DIN EN ISO 4545- 1 bis -4 (HK) $350_{0,1/20}$) und Quarz (HG 2, HK $570_{0,1/20}$) mit einem Werkzeug D10 C75, Bronzebindung gemessen. Der höchstmögliche Abtrag bei Quarz betrug $0,05 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ bei $5 \frac{N}{\text{mm}^2}$, während bei SF57 $0,018 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ bei $4,8 \frac{N}{\text{mm}^2}$ erreicht

wurden. Das spiegelt die Angaben der Schleifbarkeitsklasse wider (vgl. Abbildung 5.12).

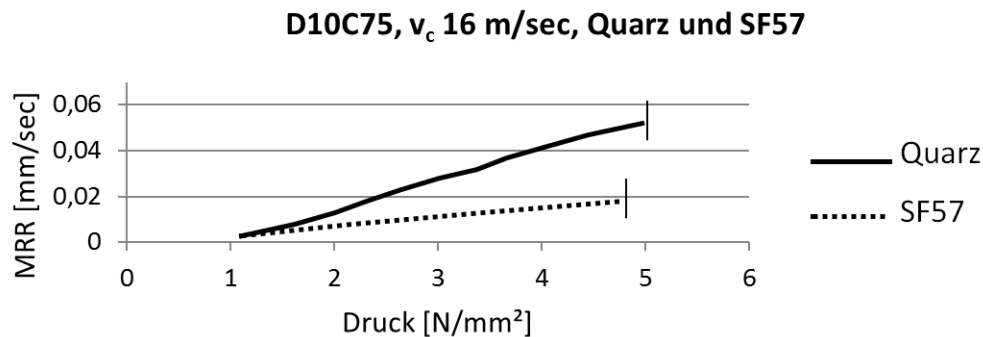


Abbildung 5.12: Materialabhängigkeit der gPVA-Kennlinie bei Fixierung aller anderen Einflussparameter

5.4 Beispiele industrieller Anwendung

5.4.1 Zentrieren einer Linse durch Tandemschleifen

Die Randbearbeitung der in Abbildung 5.13 dargestellten Linse soll mit gPVA optimiert werden. Es handelt sich dabei um ein Serienprodukt mit Losgrößen von 80-100 Stück. Die gesamte Bearbeitung der Linse gliedert sich in fünf Schritte. gPVA wird exemplarisch am ersten Schritt „Tandemschruppen des Randzylinders“ erläutert.

Die Bearbeitungszeit für diesen Prozessschritt liegt in der Serienproduktion nach „Trial & Error - Optimierung“ bei 3:10 min. Die gesamte Fertigungsdauer mit allen fünf Prozessschritten beträgt vor Optimierung 6:35 min. Abbildung 5.15 zeigt die ermittelte gPVA-Kennlinie für den Linsenwerkstoff und das für diesen Prozessschritt eingesetzte Werkzeug. Punkt A definiert den vor gPVA genutzten Betriebszustand, Punkt B die Zielvorgabe nach gPVA.

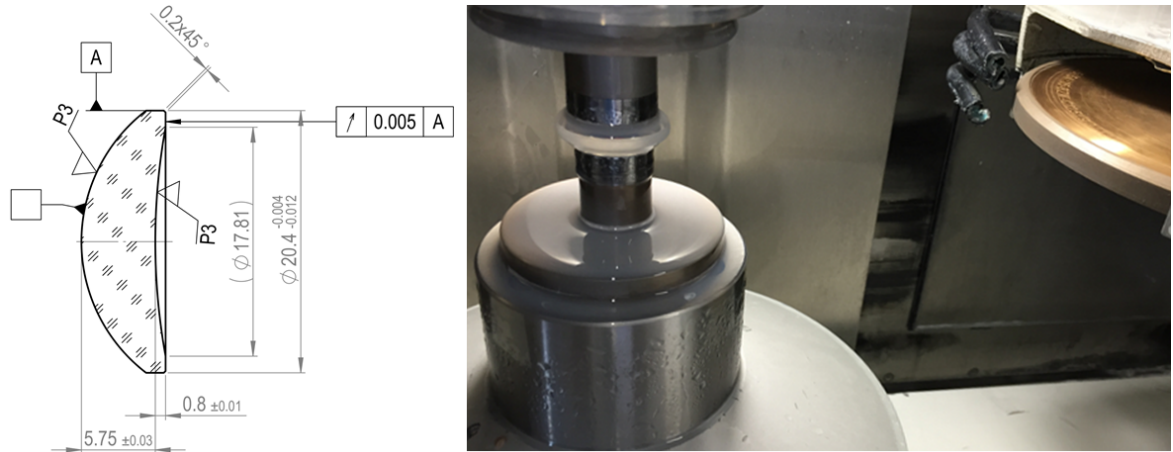


Abbildung 5.13: Fertigungszeichnung der im gPVA-Industrietest zum Zentrierschleifen genutzten Linse (links),

Foto Bearbeitungsanlage Arbeitsraum mit glockengespannter Linse (rechts)

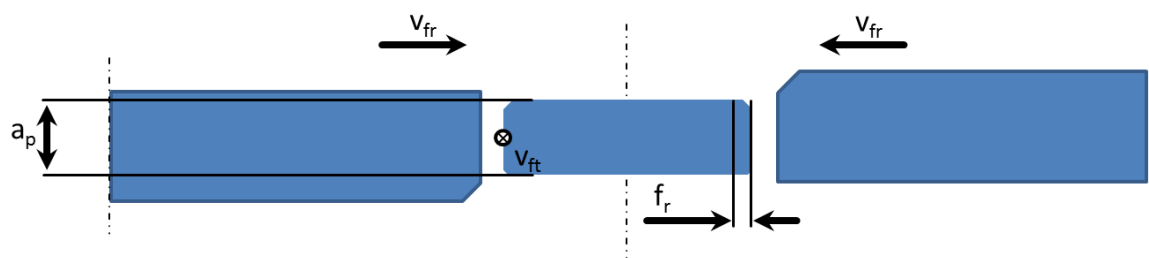


Abbildung 5.14: gPVA-Industrietest Tandemschleifen Randzylinder, Formelwerk siehe Gleichungen 5.8 bis 5.14

$$f_r = \frac{1}{2 * n_w} * v_{fr} \quad (5.8)$$

$$l_g = \sqrt{2 * f_r * \frac{R * r_w}{R + r_w}} \quad (5.9)$$

$$A_c = l_g * a_p \quad (5.10)$$

$$v_{ft} = 2 * r_w * \pi * n_w \quad (5.11)$$

$$\dot{V} = f_r * a_p * v_{ft} \quad (5.12)$$

$$MRR(v_c) = \frac{\dot{V}}{A_c * 60} \quad (5.13)$$

$$MRR = MRR(v_c 1 \frac{m}{sec}) = \frac{MRR(v_c)}{v_c} \quad (5.14)$$

Radius Werkstück in mm (r_w)

Drehzahl Werkstück in $\frac{U}{min}$ (n_w)

Radiale Vorschubgeschwindigkeit in $\frac{mm}{min}$ (v_{fr})

Bei der Tandem-Randbearbeitung werden zwei horizontal angeordnete Schleifscheiben radial in Richtung der Linse verfahren, um den Randzylinder auf den geforderten Nenndurchmesser zzgl. Schlichtaufmaß herunterzuarbeiten. Die Bahnen der beiden Werkzeuge beschreiben dabei zwei konzentrische Spiralen entlang des Linsenzylinders. Abbildung 5.14 illustriert den Prozess und das zugehörige Formelwerk (Gleichung 5.8 bis 5.14). Für die Optimierung wird entsprechend Kennfeld (Abbildung 5.15) eine MRR von $0,08 \frac{mm}{sec}$ vorgegeben. Die Schnittgeschwindigkeit wird mit $20,11 \frac{m}{sec}$ festgelegt. Bei einem Werkzeugdurchmesser von ca. 120 mm entspricht das einer Werkzeugdrehzahl von $3203 \frac{U}{min}$. Bei der vorliegenden Kinematik wird die Vorschubgeschwindigkeit in Richtung der Zerspanung v_{fr} durch die Drehzahl des Werkstücks eingestellt. Die Vorschubgeschwindigkeit v_f beeinflusst dagegen die Größe der Kontaktfläche. Um die Kontaktflächen und damit die Kräfte möglichst gering zu halten, wird der Vorschub je Schleifscheibe und Werkstückumdrehung mit $20 \mu m$ je Werkstückumdrehung gewählt. Das entspricht einem der Korngröße des Werkzeugs adäquatem Wert. Um die geforderte Abtragsrate von $0.08 \frac{mm}{sec}$ zu erreichen, wird die Werkstückdrehzahl auf 50

$\frac{U}{min}$ eingestellt. In Verbindung mit den vorgegebenen $20 \mu m$ Schnitttiefe je Werkzeug errechnet sich daraus ein Radialvorschub von $1.6 \frac{mm}{min}$. Die Optimierung der weiteren Prozessschritte folgt analog. Insgesamt wird so die Bearbeitungszeit von 6:35 min auf 5:47 min reduziert. Das entspricht einer Produktivitätssteigerung von 12 %, bei einer Anhebung des Yields von 80 auf 99 %. Wie aus Abbildung 5.15 ersichtlich, befanden

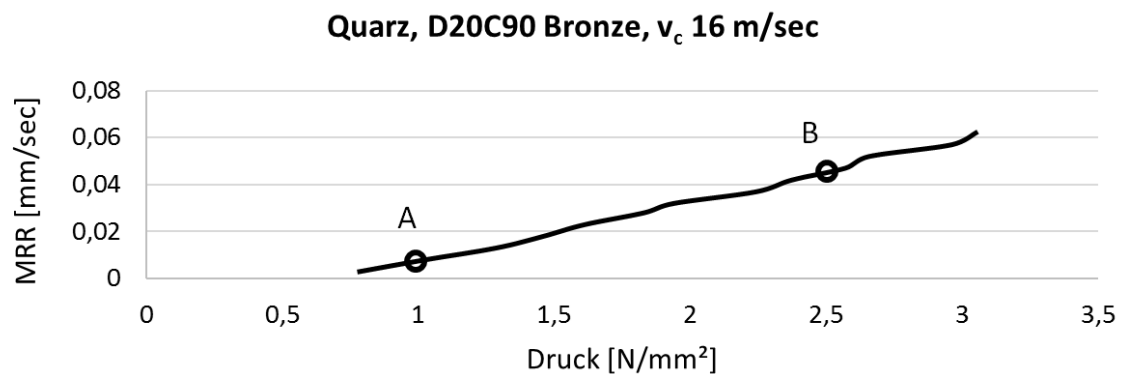


Abbildung 5.15: gPVA-Kennlinie zum Zentrierschleifen der in 5.13 dargestellten Linse, Werkzeug D20 C90 Bronzebindung

sich die Betriebspunkte vor der Optimierung überwiegend am unteren Ende des Prozessfensters. Umgesetzt wurde dies mit Schnittgeschwindigkeiten von über $30 \frac{m}{sec}$, wobei es sich dabei um durchaus übliche Werte handelt. Der erhöhte Wärmeeintrag und die geringe Schnitttiefe bei kleinen Vorschubgeschwindigkeiten führten dazu, dass Teile des zerspannten Glasmaterials an der Schleifscheibe anhafteten (vgl. Abbildung 5.16) und die Selbstschärfung des Werkzeugs behinderten. Dieser Effekt bewirkte erhebliche Schwankungen der erzeugten Rauheiten in der Produktion (siehe Abbildung 5.17).

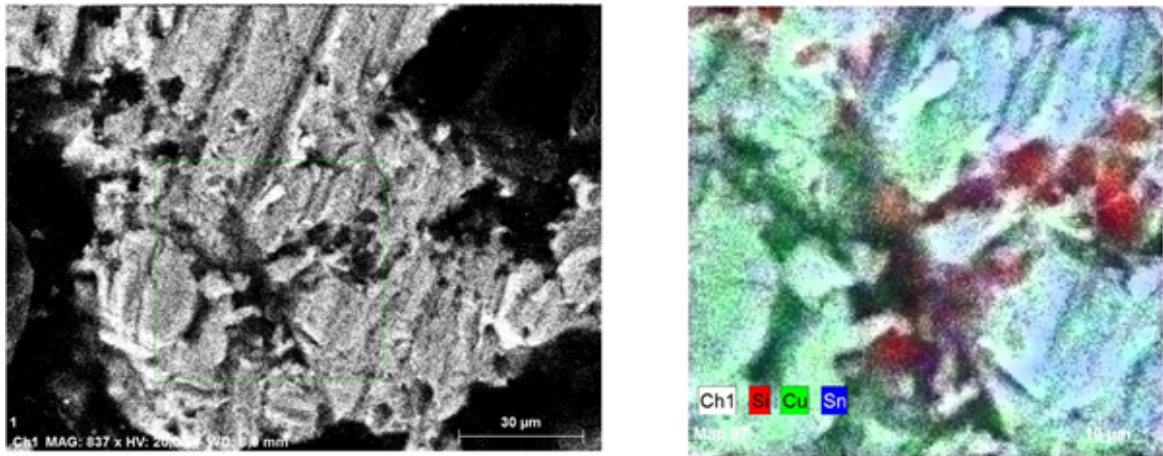


Abbildung 5.16: EDX-Messung zum Nachweis von Silizium Anhaftungen an einer Schleifscheibe, die unterhalb des gPVA Prozessfensters genutzt wurde

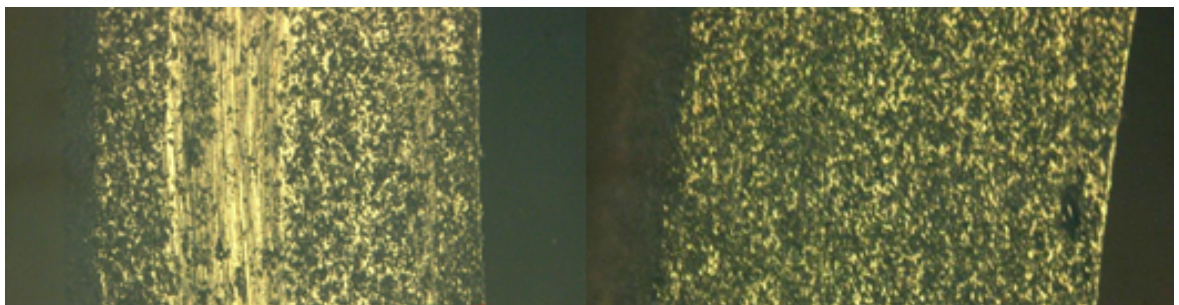


Abbildung 5.17: Bsp. Schliffbild vor (links) und nach Optimierung (rechts)

5.4.2 Optimierung des Randschleifens eines Linsenzylinders

Beim zweiten Anwendungsbeispiel soll der Schleifprozess für eine Linse aus Quarz mit Durchmesser 3 mm optimiert werden. Der nach Trial & Error eingestellte Prozess dauert rund 10 Minuten. Bei dem verwendeten Werkzeug handelt es sich um eine Schleifscheibe D20 C90. Anders als beim vorhergehenden Beispiel wird das Werkstück

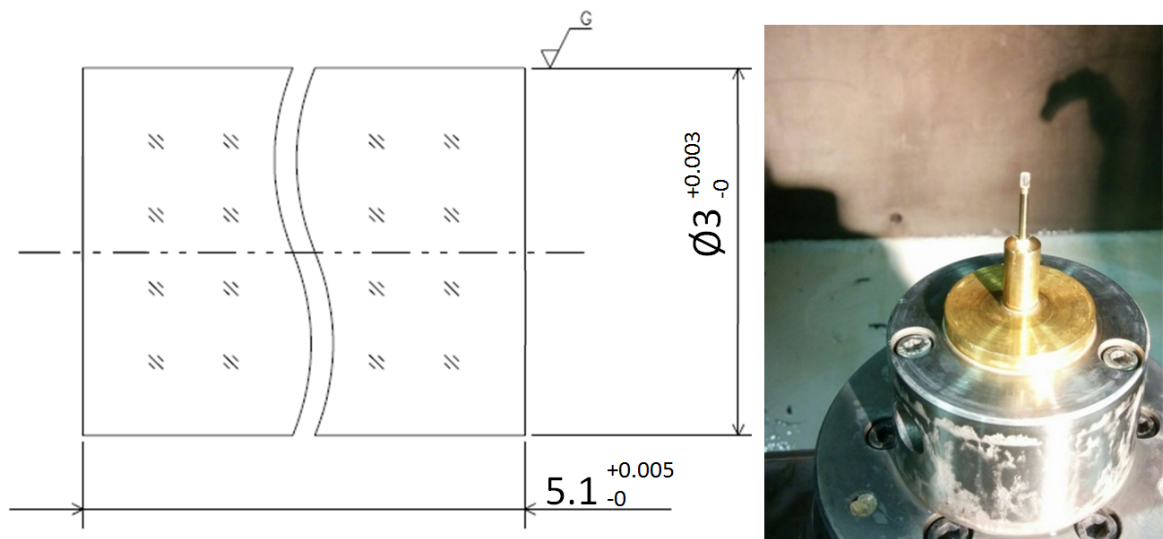


Abbildung 5.18: Anwendungsbeispiel, Randschleifen einer Stablinse aus Quarzglas

nur mit einer Schleifscheibe, Durchmesser 120 mm bearbeitet. Das Werkstück rotiert um seine Symmetrieachse. Drehachse von Werkzeug und Werkstück sind parallel zueinander ausgerichtet. Die Vorschubrichtung erfolgt achsparallel von oben nach unten, es wird mit nur einer Scheibe bearbeitet. Durch diese Kinematik bearbeitet das Werkzeug sowohl mit der Umfangs- als auch mit der Seitenfläche, so dass zwei Schleifprozesse parallel stattfinden. Der Schleifprozess mit der Seitenfläche des Werkzeugs ist im Folgenden mit „axial“, der Schleifprozess mit der Umfangsfläche als „tangential“ bezeichnet. Das geometrische Modell beinhaltet folgende Formeln (vgl. Abbildung 5.19 und Gleichung 5.15 bis 5.27):

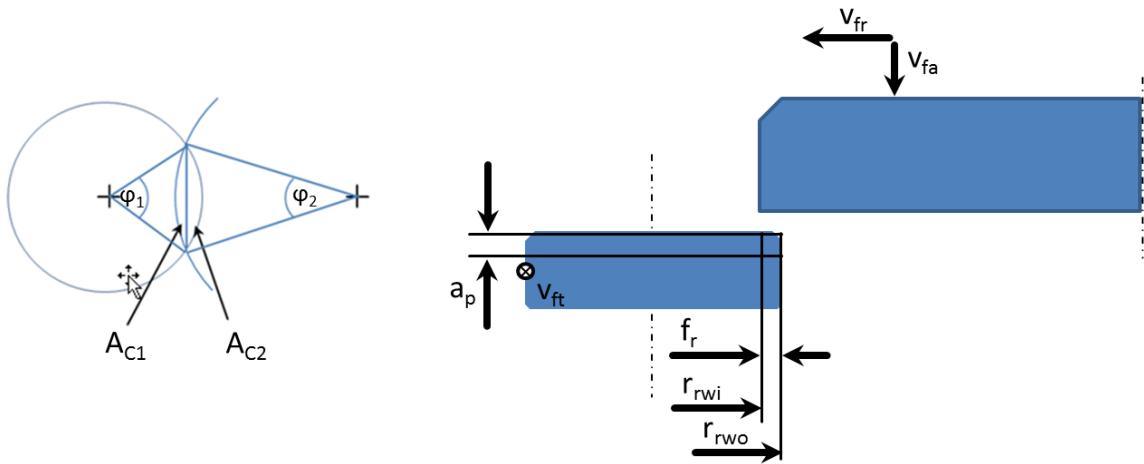


Abbildung 5.19: Kinematik Beispiel Randschleifen eines Zylinders

Formelwerk tangentialer Anteil der Zerspanung:

$$a_p = \frac{1}{n_w} * v_{fa} \quad (5.15)$$

$$l_g = \sqrt{2 * f_r * \frac{R * r_{wo}}{R + r_{wo}}} \quad (5.16)$$

$$A_c = l_g * a_p \quad (5.17)$$

$$v_{ft} = 2 * R * \pi * n_w \quad (5.18)$$

$$\dot{V}_{tangential} = f_r * a_p * v_{ft} \quad (5.19)$$

$$MRR_{tangential} = \frac{\dot{V}}{A_c * v_c * 60} \quad (5.20)$$

Formelwerk axialer Anteil der Zerspanung:

$$\varphi_1 = 2 * \arccos\left(\frac{r_{wo}^2 + (r_{wi} + R)^2 - R^2}{2 * r_{wo} * (r_{wo} + R)}\right) \quad (5.21)$$

$$\varphi_2 = 2 * \arccos\left(\frac{R^2 + (r_{wi} + R)^2 - r_{wo}^2}{2 * R * (r_{wi} + R)}\right) \quad (5.22)$$

$$A_{c1} = \frac{1}{2} * r_{wo}^2 * (\varphi_1 - \sin(\varphi_1)) \quad (5.23)$$

$$A_{c2} = \frac{1}{2} * R^2 * (\varphi_2 - \sin(\varphi_2)) \quad (5.24)$$

$$A_c = A_{c1} + A_{c2} \quad (5.25)$$

$$\dot{V}_{axial} = A_c * v_{fa} \quad (5.26)$$

$$MRR_{axial} = \frac{\dot{V}_{axial}}{v_{fa} * v_c * 60} \quad (5.27)$$

Axiale Vorschubgeschwindigkeit in $\frac{mm}{min}$ (v_{fa})

Radius Werkstück Außen in mm (r_{wo})

Radius Werkstück Innen in mm (r_{wi})

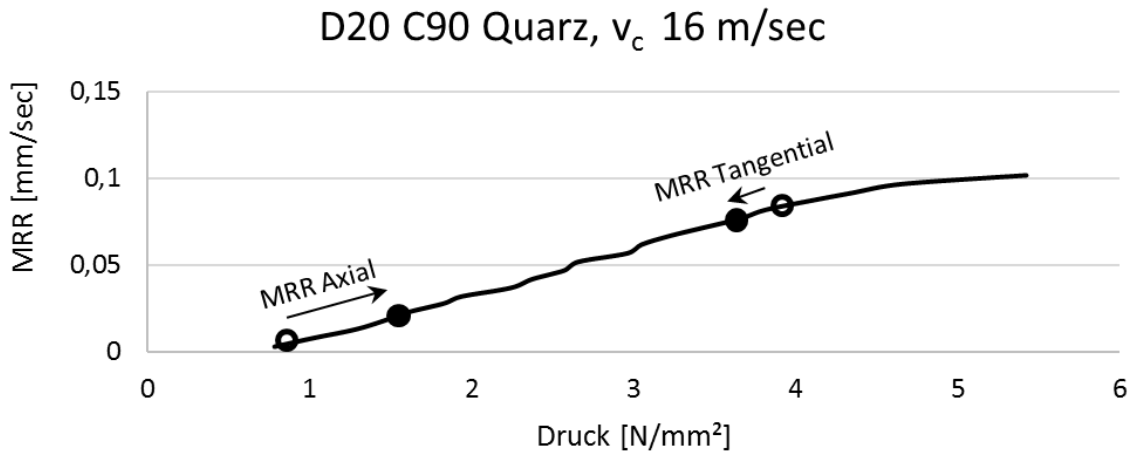


Abbildung 5.20: gPVA Kennfeld D20 C90, Quarzglas mit Betriebspunkten vor und nach Optimierung

Die für die Verschiebung der Betriebspunkte erforderliche Anpassung der Parameter

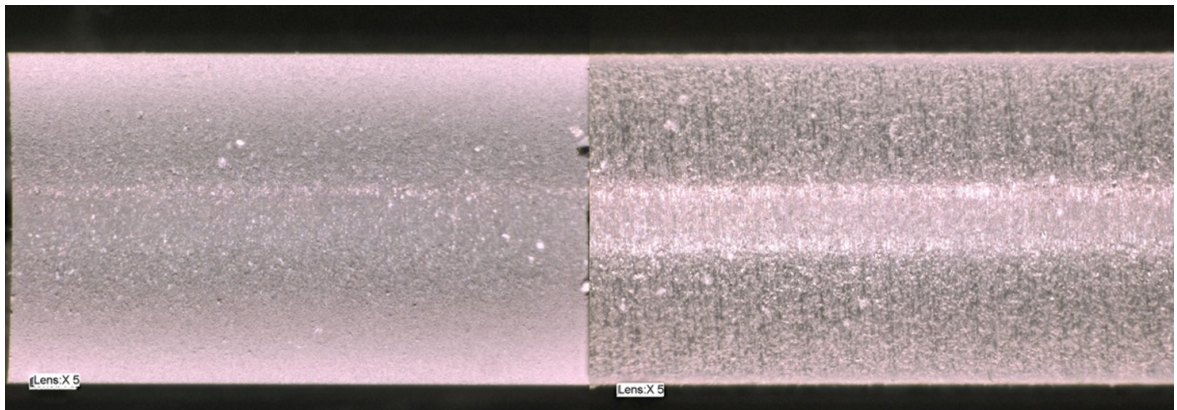


Abbildung 5.21: Aufnahme der Schliffbilder vor und nach Optimierung, Digitalmikroskopie 5xVergrößerung

ist in Tabelle 5.2 aufgelistet. Insgesamt konnte die Bearbeitungszeit um 88 % von 10 Minuten auf 1:30 Minuten reduziert werden. Durch den erhöhten Vorschub zeichnet sich am Werkstückumfang eine Spirale ab, deren Steigung a_p des axialen Prozesses entspricht (vgl. Abbildung 5.21).

| | Vorher | Nachher |
|-------------------|--------------------|--------------------|
| v_c | $32 \frac{m}{sec}$ | $20 \frac{m}{sec}$ |
| v_f | $1 \frac{mm}{min}$ | $7 \frac{mm}{min}$ |
| n_w | $40 \frac{U}{min}$ | $40 \frac{U}{min}$ |
| Bearbeitungszeit: | 10:00 min | 1:30 min |

Tabelle 5.2: Gegenüberstellung der Prozessdaten vor und nach Optimierung

6 Optimierung von Schleifsequenzen mittels gPVA

Die gPVA zugrunde liegende Methodik kann sowohl zur Optimierung einzelner Schleifprozesse als auch ganzer Schleifsequenzen verwendet werden. D. h. die Abfolge der Schleifwerkzeuge vom Grob- zum Feinschleifen kann aufeinander abgestimmt werden. Abbildung 6.1 listet die zur Prozess-Optimierung nach gPVA erforderlichen Arbeitsschritte auf. Die grundlegende Voraussetzung für die Festlegung einer Werkzeugsequenz

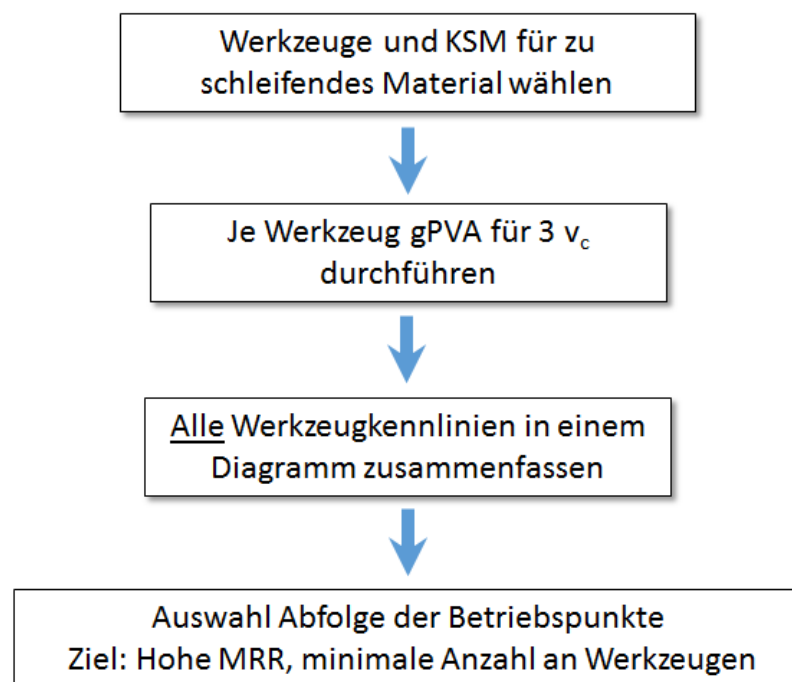


Abbildung 6.1: gPVA Schleifsequenzplanung

ist die Verfügbarkeit der materialspezifischen gPVA Kennlinien, die im Vorfeld erstellt werden müssen (siehe auch Kapitel 5 und Abbildung 5.4). Dabei sollten die selben Bedingungen herrschen wie später bei der Produktion. Im Idealfall wird bei der Schnittgeschwindigkeit mit dem Kühlschmiermittel getestet, wie später in der Produktion verfahren wird. Die in Frage kommenden Werkzeuge sollten bei drei verschiedenen

Schnittgeschwindigkeiten getestet werden, so dass das zur Fertigung praktisch nutzbare Spektrum von v_c abgedeckt wird. Die ermittelten Kennlinien werden anschließend in ein Diagramm eingetragen, um Überlappbereiche der einzelnen Werkzeuge zu ermitteln (vgl. Abbildung 6.2).

Für die Festlegung der Sequenz wird zuerst das letzte Werkzeug im Hinblick auf die erforderliche Qualität nach Abschluss der Feinstbearbeitung ausgewählt. Die Werkzeugabfolge wird dann rückwärts mit steigender Abtragsleistung zusammengestellt.

Um die gewählten Betriebspunkte in Parameter zu überführen, ist für jeden Schleifprozess ein geometrisches Modell zu entwerfen, aus dem die Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstoff und das durch die eingestellte Vorschubgeschwindigkeit entstehende Zeitspanvolumen hervorgehen. Bei der Prozessplanung werden Werkzeug und Betriebspunkt so gewählt, dass eine möglichst hohe Abtragsrate erzielt wird, um kurze Fertigungszeiten zu realisieren.

Die Zielsetzungen Produktivität und Qualität stehen dabei in einem Gegensatz. Bei der Fertigung eines Produktes werden deshalb mehrere sequentielle Schleifoperationen zur Vor- und Feinbearbeitung durchgeführt. Die Vorbearbeitung dient dabei einer raschen Annäherung der Endkontur mit geringem Aufmaß für die Fertigbearbeitung. Dabei entstehen hohe Rauheiten und Tiefenschädigungen, die bei der Feinbearbeitung zum Teil oder gänzlich wieder entfernt werden. Die erreichbare Qualität ist werkzeugspezifisch und muss experimentell ermittelt werden. Dies kann im Rahmen der gPVA-Prüfung erfolgen. Die gPVA Kennlinien ermöglichen den direkten Vergleich werkzeugspezifischer Abtragsleistungen. Somit ist direkt ersichtlich, welche Werkzeugsequenzen eine höhere Qualität bei gleicher oder verbesserter Produktivität erlauben. Die Sequenz D35 C135–D20 C90–D10 C75 ist ein Beispiel für eine konventionelle Werkzeugsequenz bei der Bearbeitung von Quarz. Abbildung 6.2 liefert einen Überblick über die möglichen Abtragsraten bei Werkzeugen mit Korngröße D35 bis D10. Mit D35 C135 ist eine maximale MRR von $0,058 \frac{mm}{sec}$ möglich. D20C90 liefert auf Quarz eine geringfügig höhere Abtragsleistung von $0,061 \frac{mm}{sec}$, bei etwa dreifachem Druck. Damit wäre eine Werkzeugsequenz D20 C90–D10 C75 hinsichtlich Produktivität das Optimum. Hier könnte ein ganzer Prozessschritt bei deutlich höherer Konvergenz der Qualität eingespart werden.

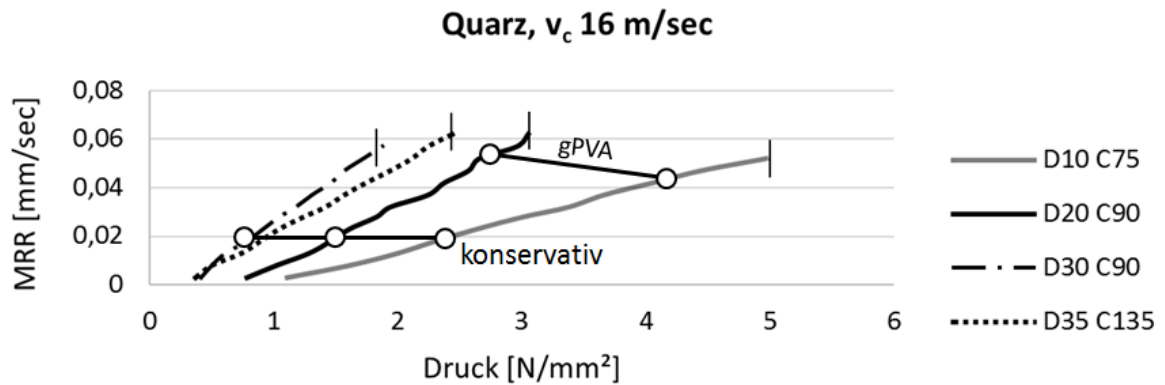


Abbildung 6.2: gPVA Kennlinien einer Schleifsequenzplanung: Eingezeichnet ist die klassische, durch Erfahrungswerte ermittelte Sequenz, sowie die quantitativ mit gPVA ermittelte, optimierte Schleifsequenz

7 Normierung von Schleifwerkzeugen mittels gPVA

7.1 Schleifnorm DIN ISO 12844

Die DIN ISO 12844 [Nor99] ist die am häufigsten genutzte Norm zur Angabe der Schleifbarkeit von Glas. Sie wird von Glasherstellern wie z.B. Schott standardisiert in sämtlichen Datenblättern verwendet. Die Schleifbarkeitsklasse wird auf Basis eines definierten, druckgesteuerten Schleifprozesses ermittelt. Die Norm beschreibt Probenumfang, Kinematik der Anlage, Beschaffenheit von Werkzeug, Werkstück, Druck, Relativgeschwindigkeit, Anordnung der Kühlschmiermittelzufuhr und Versuchsdurchführung. Die zum Test eingesetzten Diamantpellets weisen eine Korngröße von 5-12 μm auf, bei einer Kornkonzentration von 15 (entspricht $0,132 \frac{\text{gDiamant}}{\text{cm}^3 \text{ Bindung}}$). Die Prüfdrücke werden mit $0,18\text{-}0,23 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ angegeben. Es wird aus Gründen der Vergleichbarkeit empfohlen, für den Test ausschließlich Pellets desselben Herstellers zu verwenden. Die Schleifbarkeitsklasse wird über das Verhältnis der Massenverluste von fünf Proben des zu prüfenden Materials und fünf Referenzproben eines definierten Glases gebildet. Je höher der Massenverlust der Prüfgläser im Vergleich zu den Referenzgläsern, desto höher die Schleifbarkeitsklasse. Die Ergebnisse des beschriebenen Versuchs liefern Aufschluss über den erforderlichen Aufwand bei der Zerspanung eines Materials. Die in der Norm vorgeschlagene Methode ist limitiert, einerseits durch die Herstellerabhängigkeit bei der Pelletausswahl, ande-

rerseits sollten die Qualifikationstests in einem bekannten Prozessfenster durchgeführt werden.

7.2 Eignung von gPVA

gPVA ist ein weiterführendes Prüfverfahren, das den Test der Schleifbarkeit von Gläsern in bekannten Prozessfenstern ermöglicht. gPVA-Kennlinien liefern signifikante Daten hinsichtlich nutzbarer Prozessfenster. Wie in Abbildung 7.1 zu sehen, werden bei

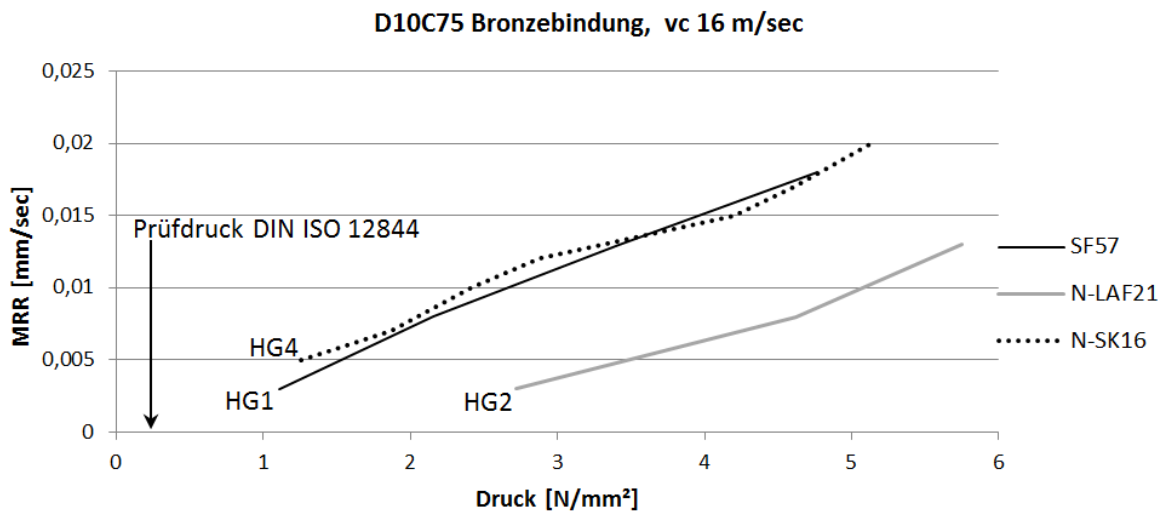


Abbildung 7.1: Vergleich Schleifbarkeitsklassen nach DIN ISO 12844 und gPVA Kennlinien

Testläufen mit identischem Werkzeug und Kühlschmiermittel bei SF57 und N-SK16 mit $0,018$ und $0,02 \frac{mm}{sec}$ sehr ähnliche Abtragsraten erzielt. Auch die gPVA-Kurven beginnen und enden nahezu im selben Druckbereich, so dass beide Materialien mit ähnlichen Werkzeugen und Parametern bearbeitet werden können. Es handelt sich allerdings um Materialien der Schleifbarkeitsklasse HG4 und HG1. Der Norm zu Folge müssten hier völlig unterschiedliche MRR bei gleichen Drücken gemessen werden. N-LAF21 sollte nach Norm mit HG2 deutlich leichter zu zerspanen sein als N-SK16 mit HG4. gPVA zeigt jedoch, dass bei gleichem Zeitspanvolumen ca. 3x höhere Drücke erforderlich sind als bei N-SK16 und SF57. Dieses Ergebnis ist auf die vergleichsweise geringen Drücke von ca. $0,2 \frac{N}{mm^2}$ zurückzuführen, die beim Prüfverfahren nach DIN ISO 12844 verwendet werden. Der Effekt, dass unter Verwendung entsprechender Drücke auch bei Gläsern mit niedriger Schleifbarkeitsklasse hohe Zeitspanvolumina erreicht werden, kommt insbesondere bei Formschleifprozessen zum Tragen. Die Kontaktflächen sind hier meist

im Bereich weniger mm^2 , so dass die Realisierung hoher Drücke kein Problem darstellt und eine hohe Produktivität erreicht werden kann. Damit ist eine Materialprüfung bei höheren Druckniveaus für die Praxis durchaus relevant.

Zusätzlich würde die Bereitstellung materialspezifischer gPVA-Kennlinien Werkzeuge einerseits direkt vergleichbar machen und andererseits die rechnerische Auslegung von Fertigungsprozessen ermöglichen. Dabei können die technologischen Anforderungen an die jeweilige Anlagentechnik direkt abgeleitet werden. Das Prinzip ließe sich ebenso auf Kühlschmiermittel übertragen, die den Ergebnissen nach hinsichtlich des Einflusses auf den Prozess ebenso berücksichtigt werden müssen, wie die Werkzeuge selbst.

7.3 Postulierte gPVA-Norm

Die Ergebnisse des Prüfverfahrens nach DIN ISO 12844 ermöglichen eine Unterteilung des gesamten Materialspektrums optischer Gläser in 6 verschiedene Schleifbarkeitsklassen. Der so vermittelte Informationsgehalt ist für die Auslegung von Schleifprozessen unzureichend. Es scheint sinnvoll die Norm zur Schleifbarkeit derart zu erweitern, dass auch der Einfluss von Schleifwerkzeugen berücksichtigt und Parameter für die Bearbeitung der geprüften Gläser beigelegt werden. Der Einsatz von gPVA stellt dies sicher und bietet darüber hinaus konkrete Kennlinien, die in der Industrie direkt umgesetzt werden können. Durch den vorgestellten Ansatz, bei dem Leistungsdaten von Werkzeugen unabhängig von Herstellerspezifikationen ermittelt werden, könnte eine experimentelle Optimierung auf der Fertigungsanlage anhand von Produkten völlig entfallen. Das System ermöglicht die direkte Berechnung von Parametern zur Umsetzung definierter Betriebspunkte mit hoher Stabilität und Reproduzierbarkeit. Der Einfluss des Mitarbeiters auf die Prozessergebnisse wird erheblich reduziert. Mindestanforderungen an die eingesetzte Fertigungstechnologie können direkt abgeleitet werden. Das System ermöglicht eine lückenlose Off-Line-Prozessplanung, bei der Optimierungsversuche an Kundenteilen nicht mehr zwingend notwendig sind. Damit werden erhebliche Risiken und Kosten beim Einrichten von Schleifprozessen vermieden. Ferner kann die Leistungsfähigkeit von Werkzeugen und Kühlschmierstoffen erstmals direkt miteinander verglichen werden, so dass auch hier Iterationsschleifen entfallen.

8 Duktiles Schleifen mit gPVA

Betrachtet man die illustrierten gPVA-Kurven, wird deutlich, dass für Drücke von ca. $0 - 0,3 \frac{N}{mm^2}$ keine Daten vorliegen. Eine Kraftmessung unterhalb dieser Drücke wäre wegen der relativ hohen Messfehler nicht mehr aussagekräftig. Das ist für den vorgestellten Anwendungsbereich unkritisch, da geringere Abtragsraten in der industriellen Produktion unwirtschaftlich wären und primär das obere Ende des Prozessfensters von Interesse ist. Der entwickelte Prüfzyklus beginnt darum mit einer Abtragsrate von $0,003 \frac{mm}{sec}$, wobei die Streuweite der gemessenen Drücke hier bereits bei $\pm 112 \%$ liegt.

Obwohl die ermittelten Kurven eine hohe Linearität aufweisen, wird deutlich, dass eine lineare Extrapolation bei keinem der Kennfelder durch den Nullpunkt des Koordinatensystems verlaufen würde. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit führt sogar zu einer rechtsseitigen Verlagerung dieses virtuellen Schnittpunktes mit der horizontalen Diagramm-Achse.

Wie in Kapitel 1 dargelegt, ist die theoretische Spanungsdicke entscheidend für den wirksam werdenden Mechanismus bei der Materialzerspanung. Das Überschreiten der „critical depth of cut“ (vgl. Abbildung 3.3) führt zu einer spröden Materialzerspanung. Die erläuterten Kennfelder geben MRR wieder, bei denen spröder Materialabtrag und Selbstschärfung des Werkzeugs zuverlässig auftreten.

Demnach muss eine Unterschreitung der ermittelten MRR zum Übergangsbereich Sprödschliff-Duktilschliff führen (vgl. Abbildung 8.1). [FD17] weist nach, dass die

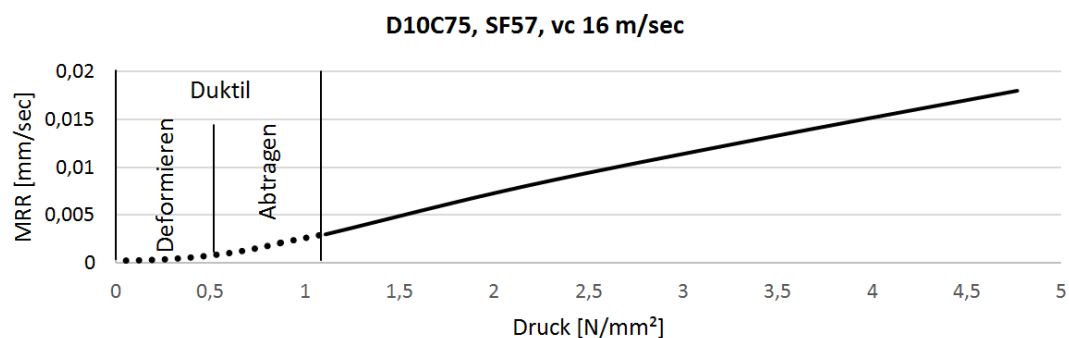


Abbildung 8.1: gPVA für duktiles Schleifen

Schnitttiefe im duktilen Bereich Auswirkungen auf die erzeugte Rauheit hat. Die

Rauheit lässt sich durch Reduzierung der Schnitttiefe im Bereich von 5-10 nm Ra verbessern. Dies belegt, dass es innerhalb des duktilen Modis einen druckabhängigen Übergangsbereich gibt. Durch eine Anpassung von Equipment und Versuchsprozedere kann gPVA genutzt werden, um diesen Bereich weiter zu untersuchen und duktile Prozesse auch auf einfacher ausgestattete Anlagen zu übertragen (siehe auch Kapitel 9.2).

9 Weiterführende Themen

9.1 gPVA Formalismus zur Beschreibung des Asphärenschleifens

Ein Kernsegment der Optikfertigung ist das Schleifen asphärischer Halbzeuge. Schleifprozesse zur Herstellung rotationssymmetrischer Asphären mit Kugelsegmentwerkzeugen und Spiralbahnen (vgl. Abbildung 9.1) zeichnen sich durch hohe Flexibilität aus und sind für Optikhersteller von besonderem Interesse. Deshalb wird dieses Fertigungsverfahren anhand eines konkreten Beispiels explizit beleuchtet. Das bereitgestellte Formelwerk lässt sich auf nahezu jeden beliebigen Schleifprozess mit Kugelsegmentwerkzeug übertragen (z.B. zur Herstellung von Freiformflächen).

Um einen Parametersatz für die Feinbearbeitung einer Asphäre zu errechnen, müssen die geometrischen Verhältnisse bestimmt werden. In Abbildung 9.1 sind die geplante Spiralbahn des Werkzeugs, das Werkzeug selbst sowie Flächenverhältnisse skizziert. Als Berechnungsbeispiel dient ein typischer Feinschleifprozess, für den ein Werkzeug D10C75 auf Quarz verwendet wird (Abbildung 5.12). Folgende Parameter und Abmaße werden definiert:

MRR $0,05 \frac{mm}{sec}$

Schnittgeschwindigkeit $v_c 15 \frac{m}{sec}$

Werkzeugdurchmesser 100 mm

Spiralabstand 0,1 mm

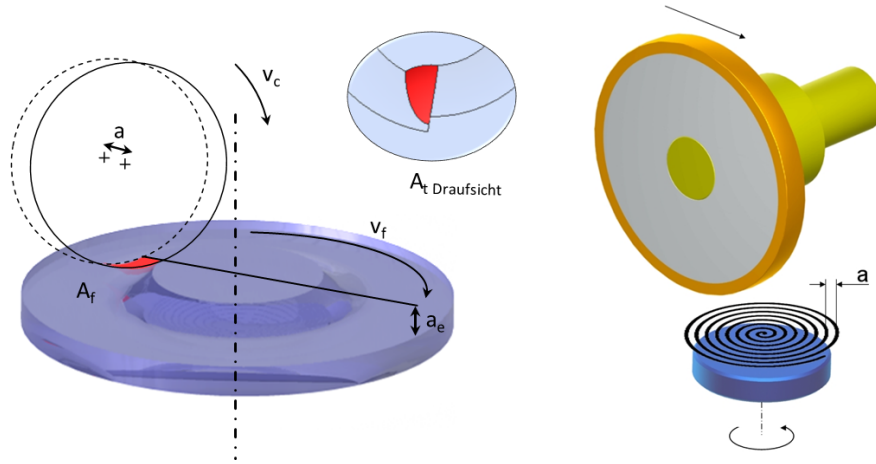


Abbildung 9.1: Geometrische Verhältnisse Asphärenscheiffräse, Werkstückachse und Werkzeugachse orthogonal

Schnitttiefe 0,02 mm

Es gilt näherungsweise:

$$A_f = a * a_e \quad (9.1)$$

$$A_c = \frac{2 * \pi * R * a_e}{360} * \arccos\left(1 - \frac{a_e}{R}\right) \quad (9.2)$$

$$MRR = \frac{A_f * v_f}{A_c} * \frac{1}{v_c} \quad (9.3)$$

Aus Gleichung 9.1 bis 9.3 errechnet sich eine Vorschubgeschwindigkeit von $0,63 \frac{m}{min}$ bei $v_c 15 \frac{m}{sec}$. Erhöht man die Schnittgeschwindigkeit auf $25 \frac{m}{sec}$, errechnet sich eine Vorschubgeschwindigkeit von $1,08 \frac{m}{min}$. Eine Erhöhung der Schnitttiefe führt bei identischen Parametern zu einer Reduzierung der Abtragsrate. Grund ist, dass die Kontaktfläche bei Erhöhung der Schnitttiefe in größerem Maß ansteigt als das Zeitspanvolumen. Verdoppelt man die Schnitttiefe, reduziert sich die Abtragsrate in beiden Fällen auf $0,036 \frac{mm}{sec}$. Im Umkehrschluss führt eine Reduzierung der Schnitttiefe auf 0,01 mm zu einer Erhöhung der Abtragsrate auf $0,07 \frac{mm}{sec}$. Der Betriebspunkt liegt damit außerhalb des Parameterfensters, obwohl ein geringeres Zeitspanvolumen erreicht wird! Ohne das aufgestellte Modell wäre der naheliegende Schluss, dass die MRR mit abnehmendem Zeitspanvolumen sinkt. Wird diese falsche Annahme bei einer experimentellen Optimierung angewandt, führt dies zu fehlerhaften Ergebnissen.

9.2 Grolishing

Die Formerzeugung von CNC-Schleifmaschinen wird durch Positionssteuerung realisiert. Steifigkeit und Positioniergenauigkeit der Anlage limitieren damit die herstellbare Formgenauigkeit. Diese Problematik kann durch den Einsatz elastischer Werkzeuge umgangen werden. Durch einen elastischen Unterbau wird ein kraftgesteuertes Feinstkorrigieren ermöglicht [VAM⁺11] [VSA⁺11a][VSR14]. Computer Controlled Optical Surfacing (CCOS))-gestützte Polierverfahren [Jon91] liefern durch einen zeitlich konstanten Materialabtrag die Möglichkeit exakte Oberflächen herzustellen. Die Anforderungen hinsichtlich Positioniergenauigkeit und Steifigkeit sind bei Polieranlagen i.d.R. geringer als bei Schleifanlagen. Der Einsatz von Industrierobotern für Polieraufgaben ist nicht unüblich. Die erforderliche Abtragskontinuität entsteht beim Computer Controlled Polishing (CCP) durch fortwährende Erneuerung des Poliermediums und den Einsatz entsprechend standfester Polierfolien. Bei Schleifwerkzeugen ist eine hohe Selbstschärfung notwendig, die ggf. mit hohem Verschleiß einhergeht. Während dieser bei weggesteuerten Prozessen zu Formfehlern am Werkstück führt, wird der Verschleiß bei elastischen Werkzeugen automatisch korrigiert und ist damit weniger kritisch. Beim sog. Grolishing wird dieser Effekt genutzt. Es handelt sich hier um einen Schleifprozess mit elastischen Werkzeugen, der in Polieranlagen verwendet wird [YWL12]. Als Werkzeug werden meist Schleifpellets auf eine elastische Membran geklebt. Die Membran lässt sich mit Druckluft beaufschlagen, so dass ein konstanter Druck in der Kontaktzone erreicht wird.

Dieser Effekt kann auch durch andere Konstruktionen erreicht werden, so dass das Prinzip auch auf einfacher aufgebauten Anlagen übertragbar wird. Abbildung 9.2 listet Versuchsergebnisse aus Korrekturvorgängen mit an der Technische Hochschule Deggendorf (THD) entwickelten, elastischen Werkzeugen auf. Die Flächen wurden mit einem für die Feinoptik typischen Spiralschleifprozess vorbereitet und anschließend mit einem elastischen Werkzeug korrigiert. Der PV vor der Korrektur repräsentiert dabei für die verwendete Anlage typische Genauigkeiten. Die elastische Lagerung des Schleifbelags kann durch Ausnutzung verschiedenster Effekte realisiert werden. Abbildung 9.3 zeigt einige konstruktive Varianten eines elastischen Radwerkzeuges. Alle Varianten liefern eine hohe Konvergenz in Verbindung mit Verweilzeitalgorithmen und unterscheiden sich lediglich in der erreichten Standzeit. Die Werkzeugkosten betragen im Vergleich zu konventionellen Schleifwerkzeugen für die Optik lediglich 10-20 %. Dabei werden höhere Genauigkeiten und geringere Schädigungstiefen erreicht, wobei die technologischen

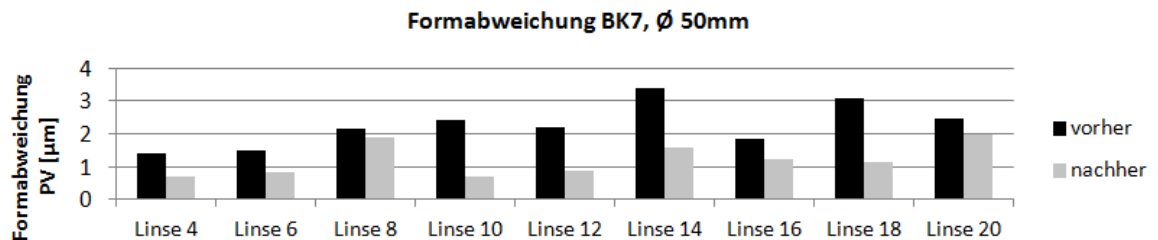


Abbildung 9.2: Korrekturversuch mit elastischem Werkzeug D14 Kunststoff auf BK7

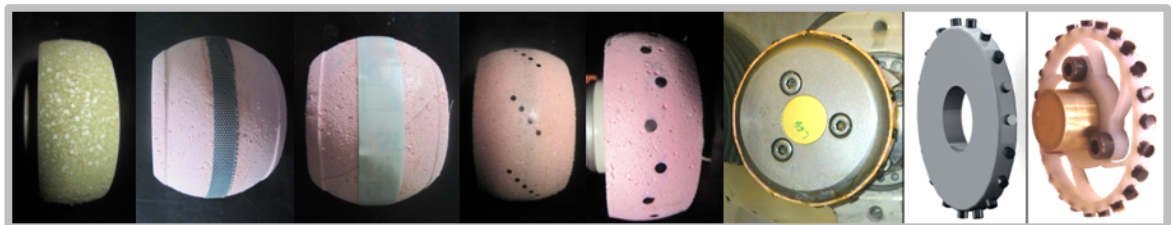


Abbildung 9.3: Elastische Werkzeuge, Generationen 1-8:

1. Diamantkorn durchsetzte PU-Folie mit Elastomer-Unterlage
- 2, 3. Schleifolie mit Diamantkorn und Elastomer-Unterlage
- 4, 7. Eingebettete Diamantpellets mit Elastomer-Unterlage
8. Eingebettete Diamantpellets mit 3D-gedrucktem ABS Federelement

Anforderungen an die Anlagentechnik wesentlich geringer sind.

9.3 In-Situ-Messung Laserpolitur

C-Lasso [RVF17] ist ein in Situ Messsystem, das bei Polierprozessen Anwendung findet. Es dient dazu, während einer Politur innerhalb des Werkzeugspots die Konvergenz der Oberflächenqualität zu messen. Die Oberflächenqualität hinsichtlich Rauheit und Tiefenschädigung nähert sich bei der Politur mit zunehmender Verweilzeit einer Asymptote an. Ist diese erreicht, ist eine weitere Erhöhung der Bearbeitungszeit unwirtschaftlich.

Das System beruht auf dem Prinzip von iTIRM (intensity-detecting Total Internal Reflection Microscopy) [FZL⁺15]. Dabei wird ein Laserstrahl über die polierte Rückseite der zu bearbeitenden Probe eingekoppelt. In der Probe trifft dieser auf die Rückseite der zu polierenden Fläche und wird dort total reflektiert. Der reflektierte Strahl koppelt auf der Rückseite der Probe wieder aus und wird dort von einem Intensitätssensor aufgefangen. Oberflächendefekte, wie z.B. SSD oder Rauheitsspitzen verhindern die Totalreflektion partiell und reduzieren die Intensität des reflektierten Strahls. Wird nun während der Bearbeitung die Summe an Rauheitsspitzen und Tiefenschädigungen gesenkt, wird ein höherer Anteil des Laserlichtes reflektiert und am Detektor eine höhere Leistung gemessen (vgl. Abbildung 9.4 und 9.5). Dieses Verfahren wurde zur

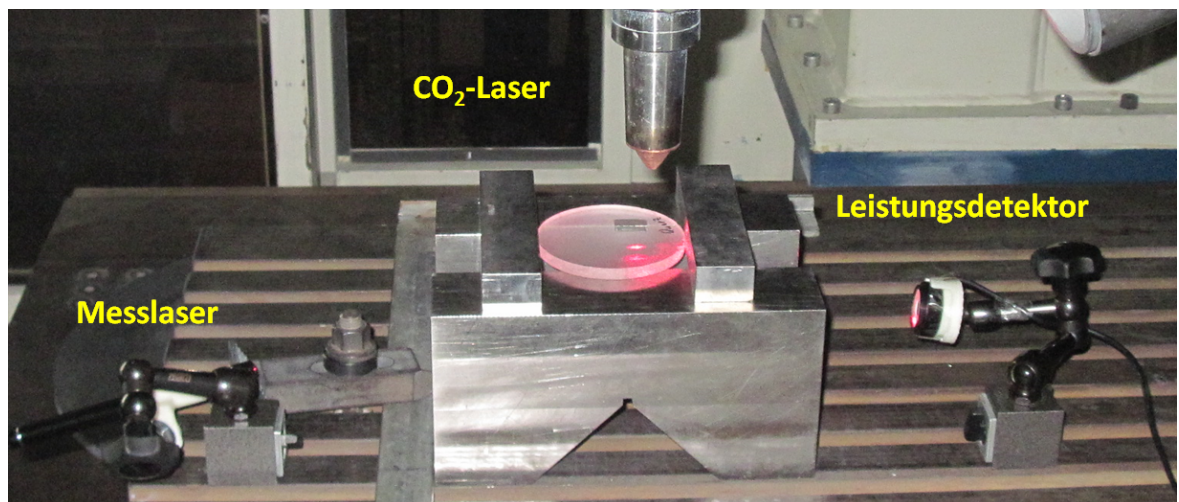


Abbildung 9.4: Versuchsaufbau

in Situ Messung bei der Laserpolitur adaptiert, um die minimale Verweilzeit bei der Laserpolitur zu ermitteln. Eine gegenseitige Beeinflussung von Bearbeitungslaser und Laserdetektor wird durch die unterschiedlichen Wellenlängen bzw. Empfindlichkeitsbe-

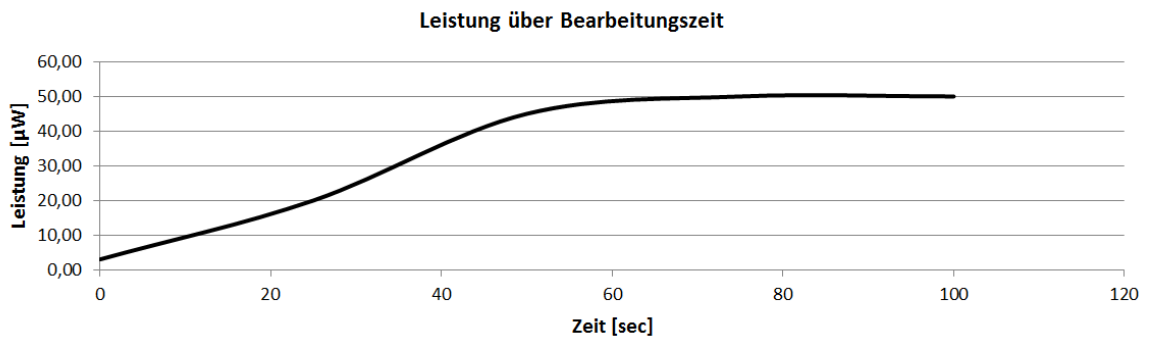


Abbildung 9.5: Konvergenz des reflektierten Lasers

reiche sowie den Transmissionsbereich des Werkstoffes zuverlässig verhindert. So werden unnötig hohe Polierzeiten vermieden, die zur Verdampfung und Abscheidung von Glas und zusätzlichen Oberflächenfehlern führen können, wie z.B. Erstarrungswellen.

9.4 Regelkreisgestütztes Polieren

Marktübliche Poliervverfahren basieren auf iterativem Messen und Polieren. Dabei wird eine Messung der Ausgangsform des Werkstücks durchgeführt. Mit Hilfe eines Modells des Polierwerkzeugs wird eine Karte über die Werkstückgeometrie gelegt, die Verweilzeiten des Polierwerkzeugs enthält. Die erreichbare Genauigkeit wird hauptsächlich durch die Stabilität des Abtragsverhaltens des Polierwerkzeuges bestimmt. Stabilität und Abtragsleistung verhalten sich dabei gegensätzlich, d.h. Werkzeuge mit hohem Abtrag ermöglichen weniger exakte Korrekturen und umgekehrt. Darum werden auch Polierverfahren in Vor- und Feinpolitur unterteilt. Bei der Vorpolitur wird so viel Material abgetragen, dass Tiefenschädigungen und Rauheitsspitzen zuverlässig entfernt werden. Der durchgeführte Abtrag ist i.d.R. mit einem Sicherheitsfaktor 2-3 beaufschlagt. Es wird also um ein Vielfaches mehr Material abgetragen, als dies ggf. erforderlich wäre. Polierprozesse hinterlassen auf dem Werkstück häufig Oberflächenfehler, die durch weitere Politur unter Umständen nicht mehr beseitigt werden können. Das Risiko solcher Defekte nimmt mit der Dauer der Politur bzw. der abgetragenen Pfeilhöhe zu.

Um die Polierzeiten bei der Vorpolitur zu reduzieren, wird das in Kapitel 9.3 vorgestellte Messsystem genutzt, um ein sog. Closed-Loop-Polishing oder auch Regelkreis gestütztes Polieren zu realisieren. Dabei wird die Verweilzeit des Werkzeugs über das aus der In-Situ-Messung generierte Signal geregelt (vgl. Abbildung 9.6). Die Verweilzeit wird so lange erhöht, bis das Messsignal sich einer vordefinierten Asymptote annähert

hat. Besonders bei der Politur großer Spiegel hat dies Auswirkungen auf die Vorpolitur, da mit der eigentlichen Formkorrektur wesentlich früher begonnen werden kann. Damit wird die gesamte Bearbeitungsdauer signifikant verkürzt. Derzeit wird dieser neue Ansatz in einem Feldtest geprüft [FRVK18].

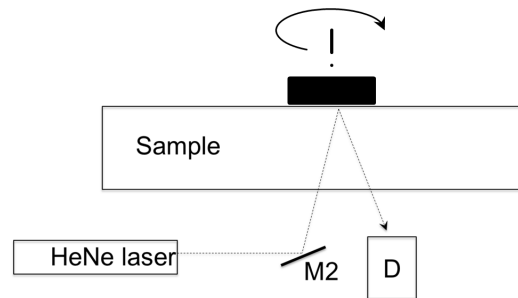


Abbildung 9.6: Prinzip-Closed-Loop-Polishing

10 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die entwickelte Methode gPVA genutzt werden kann, um Schleifwerkzeuge herstellerunabhängig und quantitativ zu bewerten. Die gewonnenen Daten dienen zur Evaluierung der getesteten Werkzeuge im Zusammenhang mit einer definierten Bearbeitungsaufgabe und liefern Aufschluss hinsichtlich der zu erwartenden Produktivität. Die Methode ermöglicht die Berechnung von Prozessparametern auf Grundlage von Werkzeugkennlinien. Die dargelegten Ergebnisse zeigen, dass eine experimentelle Prozessabstimmung durch Verwendung der präsentierten Methodik gänzlich entfallen kann bzw. der verbleibende Aufwand auf einen Bruchteil des ursprünglichen Maßes reduziert wird. Die Methodik wurde hinsichtlich Genauigkeit und relevanter Einflussgrößen untersucht, bewertet und in einem Praxistest verifiziert.

Derzeit werden Studien zum Einsatz von gPVA für Schleifnormen von Gläsern und Schleifwerkzeugen durchgeführt. Durch den Einsatz von gPVA zur Normierung von Schleifwerkzeugen werden die Leistungsdaten von Werkzeugen herstellerunabhängig ermittelt. Eine experimentelle Optimierung von Schleifprozessen anhand von Pro-

duktionssamples auf der Fertigungsmaschine könnte somit komplett entfallen. Die Anwendung der DIN ISO 12844 zur Ermittlung der Schleifbarkeitsklasse ist für eine Klassifizierung von Schleifwerkzeugen nicht geeignet.

Aktuell wird die gPVA-Methode zusammen mit der 3-Waggon-Methode (siehe 4) zum Einsatz für das Optimieren des klassischen, abrasiven Polierens sowie des Laserpolierens erweitert.

Ein gPVA-Einsatz zur Analyse des duktilen Schleifens erscheint ebenfalls sinnvoll, da kürzlich veröffentlicht wurde, dass innerhalb des Duktilschleifprozessfensters eine proportionale Abhängigkeit zwischen MRR und der erzeugten Rautiefe besteht [FD17]. Erste Abklärungen sind derzeit in Arbeit.

A Kompetenzen IPH

Die vorliegende Arbeit wurde in den Laboren der THD, Institut für Präzisionsfertigung und Hochfrequenztechnik (IPH) durchgeführt. Im Folgenden werden einige Beispiele aus dem Leistungsspektrum des Instituts aufgeführt, um einen Überblick bzgl. des vorhandenen Know-Hows über Prozesstechnologie und Analyseverfahren zu vermitteln.

A.1 Schleifen

Abrichten und Schärfen

Die Entwicklung von Abrichtprozessen sowie die Kontrolle des Erfolgs sind zentrale Elemente der Arbeitsvorbereitung. Hierfür stehen diverse Prozess- und Analysetechniken zur Verfügung, wie z.B. ELID, Digital- und Konfokalmikroskopie:

Asphärenfertigung

Eine Kernkompetenz des IPH ist die Herstellung sphärischer und nicht sphärischer Optiken, mit und ohne Achsensymmetrie. Die Dimensionen reichen von Durchmesser 50-2000 mm. Übliche Spezifikationen sind Formfehler von 1-5 μm und Rauheiten bis 200

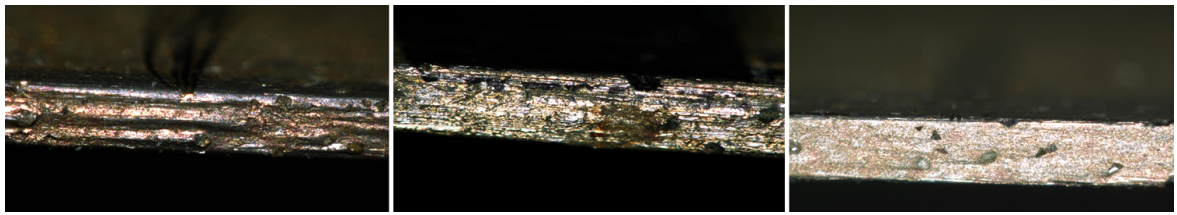


Abbildung A.1: Bsp: Mikroskopanalyse Abrichten einer D181 Schleifscheibe

nm nach dem Schleifen (vgl. Abbildung A.2). Technologisch möglich sind geschliffene

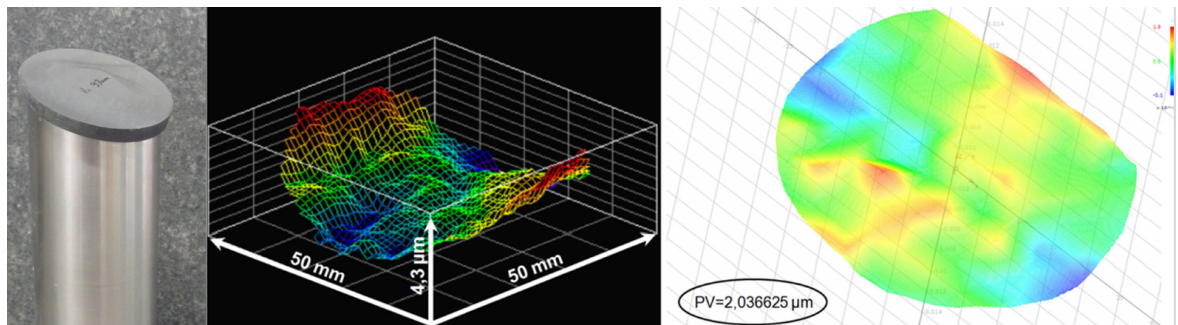


Abbildung A.2: Geschliffener Off-Axis Paraboloid auf SiC

Flächen mit Rauheiten unter 5 nm Ra [VSR13] (vgl. Abbildung A.3 und A.4).



Abbildung A.3: Hochglänzend geschliffene Sphäre aus Silizium

Ultraschall unterstütztes Schleifen

Der Einsatz Ultraschall angeregter Werkzeuge ermöglicht die Herstellung feinsten Konturen auf spröde harten Werkstoffen, wie z.B. Saphir oder SiC. Durch Einsatz dieser Technologie ist man am IPH in der Lage, verschiedenste Geometrien zu erzeugen. Anfängen von Mikrobohrungen bis 0,3 mm Durchmesser (vgl. Abbildung A.5) über Leichtgewichtungen kleiner und großer Spiegel bis hin zu frei geformten Flächen (vgl. Abbildung A.6). Bzgl. zu bearbeitender Materialien gibt es praktisch keine Beschränkungen. Die Palette reicht von Quarz über BK7, Zerodur, Saphir bis hin zu Siliziumkarbid. Typische Werkstückabmessungen 30 bis 400 mm Kantenlänge.

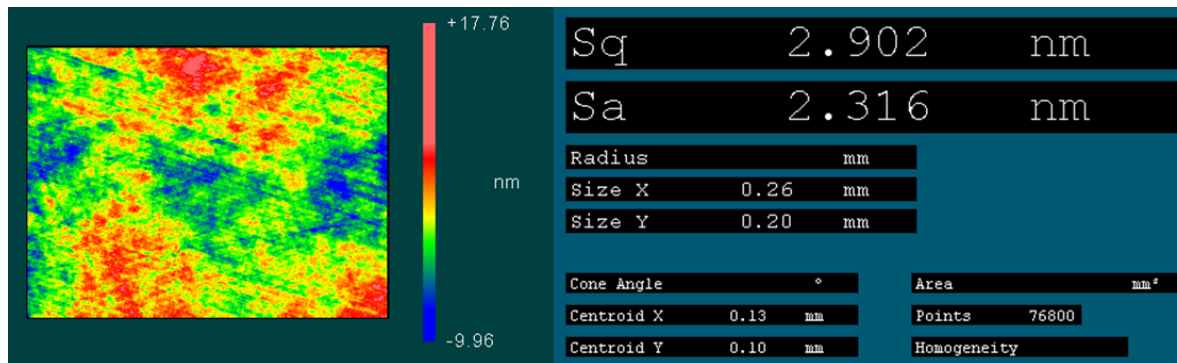


Abbildung A.4: Rauheitsmessung auf geschliffener Siliziumkarbid Probe

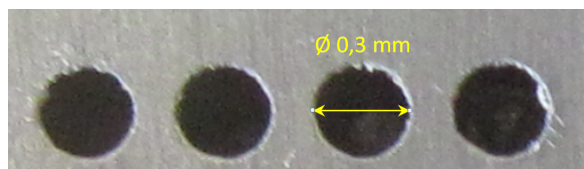


Abbildung A.5: Mikrobohrungen in Siliziumkarbid

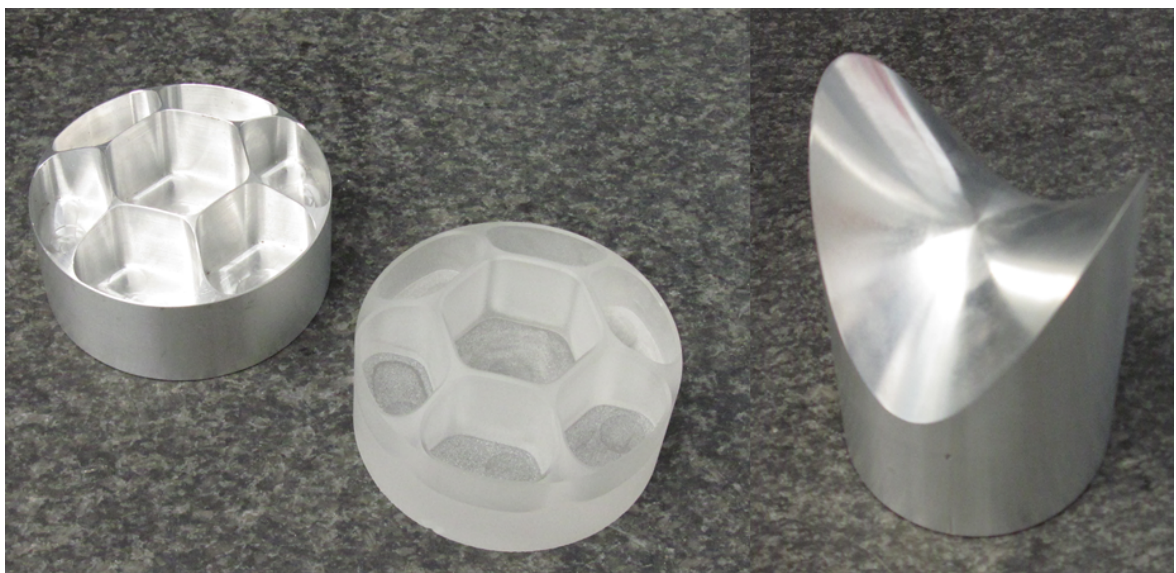


Abbildung A.6: Bsp. Ultraschall unterstützte Bearbeitung

A.2 Polieren

Politur großer Planflächen, Sphären und Asphären bis ca. 2000 mm Durchmesser, bis 20 nm PV und 0,5 nm Ra.

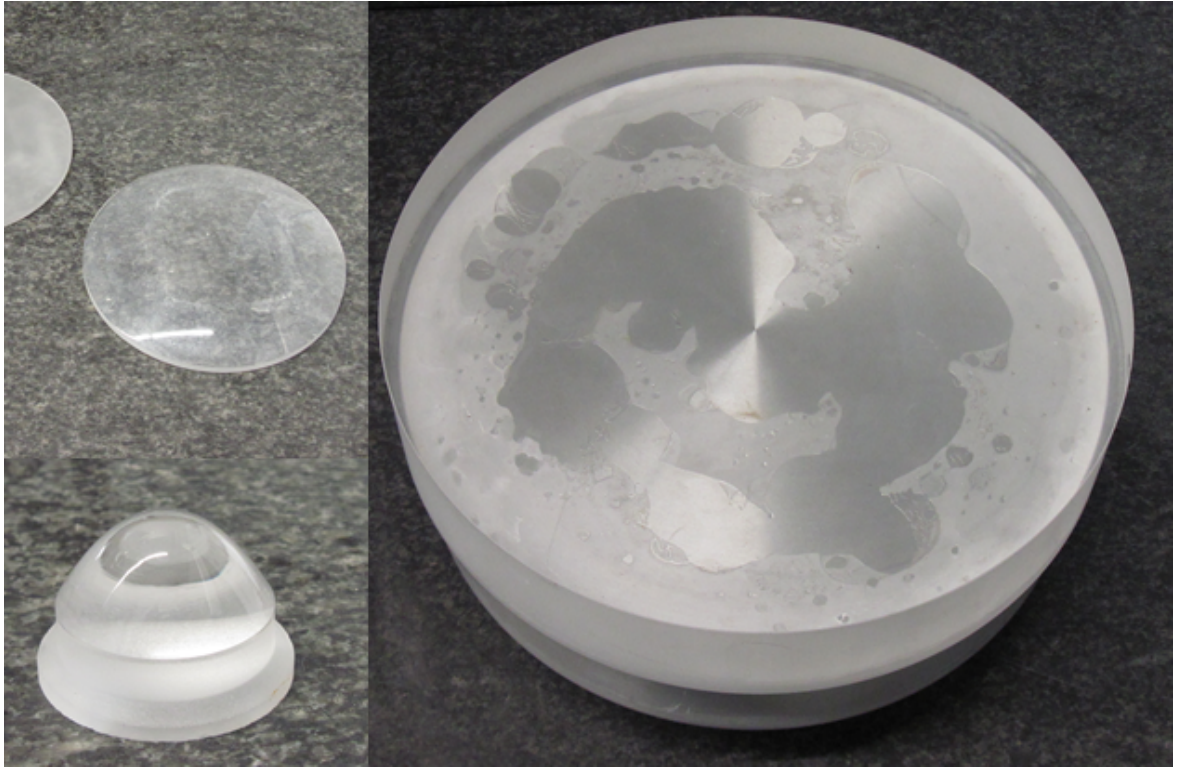


Abbildung A.7: Bsp. Politur Sphären und Asphären

A.3 Verschiedenes

- Messung von Oberflächenstrukturen mittels Interferometrie, Konfokal- oder Digitalmikroskopie
- Automatisierte Analyse der Sauberkeit von Optiken Dokumentation nach ISO 10110-7 an planen und leicht gekrümmten Flächen.
- Partikelmessung, z.B. Untersuchung von Poliersuspensionen.
- Analyse und Entwicklung von Schleifwerkzeugen (vgl. Abbildung A.9)

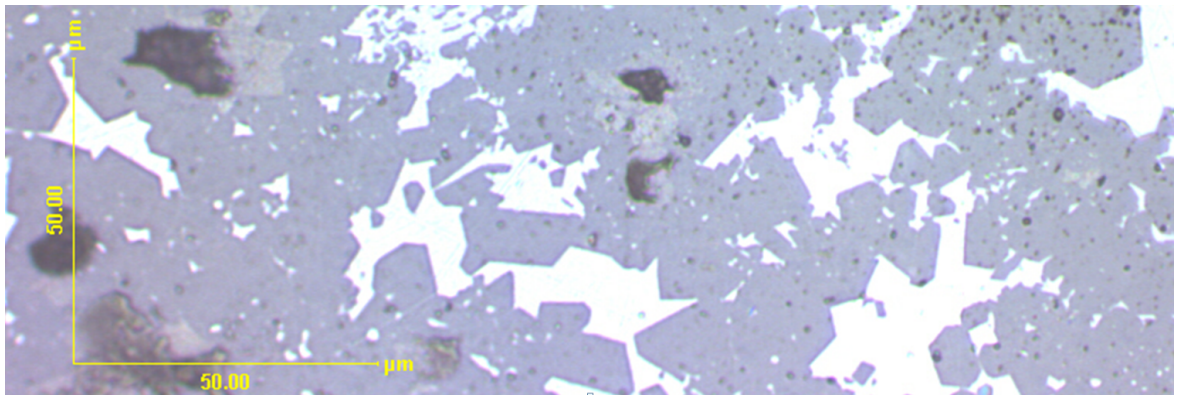


Abbildung A.8: Bsp. Mikroskopie Silizium infiltriertes Siliziumkarbid

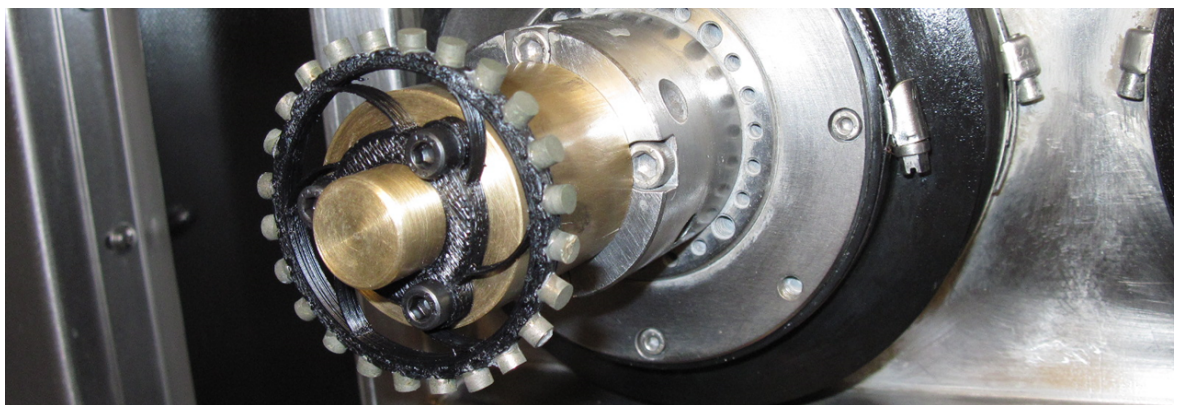


Abbildung A.9: Bsp. Prototyp elastisches Schleifwerkzeug

Literaturverzeichnis

- [Ard00] ARDELT, Thomas: *Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik*. Berlin : IPK, 2000 (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin). – ISBN 978-3-8167-5609-5
- [AXRK13] ARIF, Muhammad ; XINQUAN, Zhang ; RAHMAN, Mustafizur ; KUMAR, Senthil: A predictive model of the critical undeformed chip thickness for ductile brittle transition in nano-machining of brittle materials. 64 (2013), Januar, 114–122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.005>. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2012.08.005. – ISSN 08906955
- [BG10] BLIEDTNER, Jens ; GRAEFE, Guenter: *Optiktechnologie: Grundlagen-Verfahren-Anwendungen-Beispiele*. Muenchen : C. Hanser : Fachbuchverlag Leipzig, 2010. – ISBN 3-446-42215-3 978-3-446-42215-5
- [CFS17] CORIAND, Luisa ; FELDE, Nadja ; SCHROEDER, Sven: PSD-Analysis: The Key for Reasonable Roughness Characterization of Optical Surfaces. In: *Proceedings of the 4th European Seminar on Precision Optics Manufacturing*. Teisnach, Germany, Mai 2017
- [COR17] C. VOGT ; O. FAEHNLE ; R. RASCHER: Grinding Process Validation Approach (gPVA). In: *Journal of Physical Science and Application* 7 (2017), Mai, Nr. 5. <http://dx.doi.org/10.17265/2159-5348/2017.05.004>. – DOI 10.17265/2159-5348/2017.05.004. – ISSN 21595348, 21595348
- [DDKF16] DOETZ, Marius ; DAMBON, Olaf ; KLOCKE, Fritz ; FAEHNLE, Oliver: Chemical influence of different pH-values on ductile mode processing through ultra-precision diamond turning. In: RASCHER, Rolf (Hrsg.) ; FAEHNLE, Oliver (Hrsg.) ; WUENSCH, Christine (Hrsg.) ; SCHOPF, Christian (Hrsg.): *Proc. SPIE 10009, Third European Seminar on Precision Optics Manufacturing*. Teisnach, Juni 2016, 1000905

- [DT11] DENKENA, Berend ; TOENSHOFF, H. K.: *Spanen Grundlagen*. Heidelberg; New York : Springer, 2011 <http://public.eblib.com/EBLPublic/PublicView.do?ptiID=798908>. – ISBN 978-3-642-19772-7 3-642-19772-8
- [ERR14] ESMAEILZARE, A. ; RAHIMI, A. ; REZAEI, S.M.: Investigation of subsurface damages and surface roughness in grinding process of Zerodur glass ceramic. 313 (2014), September, 67–75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.137>. – DOI 10.1016/j.apsusc.2014.05.137. – ISSN 01694332
- [Fae16] FAEHNLE, Oliver: Process optimization in optical fabrication. In: *Optical Engineering* 55 (2016), März, Nr. 3, 035106. <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.55.3.035106>. – DOI 10.1117/1.OE.55.3.035106. – ISSN 0091-3286
- [FD17] FAEHNLE, O. ; DOETZ, Marius: Optimizing ductile mode grinding in terms of generated level of surface roughness: $R_q = f(h_{cut})$. Munich : European Optical Society, Juni 2017
- [FRVK18] FAEHNLE, Oliver ; RASCHER, Rolf ; VOGT, Christian ; KIM, Dae W.: Closed-loop laser polishing using in-process surface finish metrology. In: *Applied Optics* 57 (2018), Februar, Nr. 4, 834. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.57.000834>. – DOI 10.1364/AO.57.000834. – ISSN 1559-128X, 2155-3165
- [FZL⁺15] FAEHNLE, O. ; ZYGALSKY, F. ; LANGENBACH, E. ; WEIMER, F. ; KAHL, M. ; ETTEMEYER, E.: In situ monitoring of level of surface roughness and contamination of polishing processes. In: *EOSMTOC 2015*. Munich, Juni 2015
- [GLC⁺13] GOEL, Saurav ; LUO, Xichun ; COMLEY, Paul ; REUBEN, Robert L. ; COX, Andrew: Brittle ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide. 65 (2013), Februar, 15–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.09.001>. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2012.09.001. – ISSN 08906955
- [IKB⁺08] ISLAM, M.M. ; KUMAR, A. S. ; BALAKUMAR, S. ; LIM, H.S. ; RAHMAN, M.: Characterization of ELID grinding process for machining silicon wafers. 198 (2008), März, Nr. 1, 281–290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.077>. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2007.06.077. – ISSN 09240136

- [Jon91] JONES, R. A.: Rapid optical fabrication with CCOS. 13 (1991), Oktober, Nr. 4, 307. [http://dx.doi.org/10.1016/0141-6359\(91\)90075-T](http://dx.doi.org/10.1016/0141-6359(91)90075-T). – DOI 10.1016/0141-6359(91)90075-T. – ISSN 01416359
- [KBW⁺14] KOCH, Simon-F. ; BAUER, Joerg ; WAGNER, Henning ; HORSCH, Johannes ; BRECHT, Stefan ; FLEISCHER, Juergen: Characterization of an Eigenfrequency Adaptable Machine Tool Carriage. 14 (2014), 412–417. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.086>. – DOI 10.1016/j.procir.2014.03.086. – ISSN 22128271
- [Kli10] KLINK, A.: Wire electro discharge trueing and dressing of fine grinding wheels. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010), Nr. 1, 235–238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.076>. – DOI 10.1016/j.cirp.2010.03.076. – ISSN 00078506
- [KLT97] KOMANDURI, R. ; LUCCA, D.A. ; TANI, Y.: Technological Advances in Fine Abrasive Processes. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 46 (1997), Nr. 2, 545–596. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60880-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60880-4). – DOI 10.1016/S0007-8506(07)60880-4. – ISSN 00078506
- [KMM⁺13] KIM, Hyuk-Min ; MANIVANNAN, R. ; MOON, Deog-Ju ; XIONG, Hailin ; PARK, Jin-Goo: Evaluation of double sided lapping using a fixed abrasive pad for sapphire substrates. 302 (2013), April, Nr. 1, 1340–1344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.075>. – DOI 10.1016/j.wear.2012.11.075. – ISSN 00431648
- [Koc92] KOCH, N.: Duktile Bearbeitung optischer Glaeser zur Herstellung asphaerischer optischer Linsen. In: *Indsutrie Diamanten Rundschau* (1992), S. 118–126
- [Lee11] LEE, Y.: Evaluating subsurface damage in optical glasses. In: *Journal of the European Optical Society - Rapid publications* 6 (2011), Nr. 0. http://www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/11001. – ISSN 1990-2573
- [Mei11] MEISTER, Markus: *Vademecum des Schleifens*. Muenchen : Hanser, 2011. – ISBN 978-3-446-42618-4. – OCLC: 778100495
- [Min99] MINKE, Ekkehard: *Handbuch zur Abrichttechnik*. Affalterbach : Riegger-Diamantwerkzeuge, Werbeabt., 1999. – ISBN 3-9800532-5-3 978-3-9800532-5-9

- [MTI00] MARINESCU, Ioan D. (Hrsg.) ; TOENSHOFF, H. K. (Hrsg.) ; INASAKI, Ichiro (Hrsg.): *Handbook of ceramics grinding and polishing: properties, processes, technology, tools and typology*. Park Ridge, N.J. : Norwich, N.Y : Noyes Publications ; William Andrew Pub, 2000 (Materials science and process technology series). – ISBN 978-0-8155-1424-4
- [Nor99] NORMENAUSSCHUSS, Feinmechanik und O.: *Optisches Rohglas - Schleifbarkeit mit Diamant-Pellets - Pruefverfahren und Klassifizierung (ISO 12844:1999)*. Beuth Verlag GmbH, 1999
- [Per12] PEROVIC, Bozina: *Hydrostatische Fuehrungen und Lager: Grundlagen, Berechnung und Auslegung von Hydraulikplaenen*. Berlin : Springer, 2012 (VDI-[Buch]). – ISBN 978-3-642-20297-1 978-3-642-20298-8
- [Pre27] PRESTON, F. W.: The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines. In: *Journal of the Society of Glass Technology* 11 (1927)
- [Ric11] RICKENS, Kai: *Deterministisches Schleifen optischer Glaeser mit grobkoernen Diamantschleifscheiben*. Aachen : Shaker, 2011 (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik, Bremen 53). – ISBN 978-3-8322-9975-0
- [Row09] ROWE, W. B.: High-Speed Grinding. In: *Principles of Modern Grinding Technology*. Elsevier, 2009. – ISBN 978-0-8155-2018-4, S. 95–104
- [RVF17] RASCHER, Rolf ; VOGT, Christian ; FAEHNLE, Oliver: In situ laser polishing optimization method: Control of LASer Surface Optimisation (C-Lasso). Munich : European Optical Society, Juni 2017
- [Sch26] SCHLEICHER, F.: Der Spannungszustand an der Fliessgrenze (Plastizitätsbedingung). 6 (1926), Nr. 3, 199–216. <http://dx.doi.org/10.1002/zamm.19260060303>. – DOI 10.1002/zamm.19260060303. – ISSN 00442267
- [Sch02] SCHOENHERR, H.: *Spanende Fertigung*. Muenchen : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2002. – ISBN 3-486-25045-0
- [SS87] SINES, George ; SAKELLARAKIS, Yannis A.: Lenses in Antiquity. In: *American Journal of Archaeology* 91 (1987), April, Nr. 2, 191. <http://dx.doi.org/10.2307/505216>. – DOI 10.2307/505216. – ISSN 00029114

- [Tsc05] TSCHAETSCH, Heinz: *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung ; mit 145 Tabellen*. Wiesbaden : Vieweg, 2005. – ISBN 3-528-44986-1 978-3-528-44986-5
- [VAM⁺11] VOGT, Christian ; ADELSBERGER, Hannes ; MAURER, Roland ; SCHNEIDER, Florian ; KOLLER, Thomas ; DRAXINGER, Sebastian ; SINZINGER, Stefan ; RASCHER, Rolf ; SPERBER, Peter: Dwell time assisted grinding. EOS Conferences at World of Photonics Congress 2011. In: *EOS Conferences at the World of Photonics Congress*. Munich : EOS, 2011, S. 23
- [VRM⁺13] VOGT, Christian ; RASCHER, Rolf ; MAZAL, Jonas ; BOERRET, Rainer ; LOHNER, R. D. ; TAWAKOLI, Taghi: The cause of structures on ground shapes. Munich, Germany, 2013
- [VRR13] VOGT, Christian ; ROHRBACHER, Martin ; RASCHER, Rolf: A measurement based method to classify grinding tool conditions. In: *EOS Conferences at the World of Photonics Congress*. Munich, Germany, 2013
- [VRRS15] VOGT, Christian ; ROHRBACHER, Martin ; RASCHER, Rolf ; SINZINGER, Stefan: Dependency between removal characteristics and defined measurement categories of pellets. In: *Optomechanical Engineering 2015*. San Diego : SPIE, Dezember 2015, S. Paper 9573-23
- [VRS⁺11] VOGT, Christian ; RASCHER, Rolf ; SPERBER, Peter ; SCHNEIDER, Florian ; MAURER, Roland ; KOLLER, Thomas ; SCHINHAERL, Markus ; DRAXINGER, Sebastian ; WAGNER, Martin: Grinding Free-form-surfaces using CAD-CAM modeling Software. Rochester NY, USA, 2011
- [VRS13] VOGT, Christian ; ROHRBACHER, Martin ; SINZINGER, Stefan: Dressing and Selfsharpening of Conventional Tools. In: *Proceedings of the 13 th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology* Bd. Vol 1. Berlin : Euspen, 2013. – ISBN 978-0-9566790-2-4, S. 289-293
- [VSA⁺11a] VOGT, C. ; SINZINGER, S. ; ADELSBERGER, H. ; MAURER, R. ; SCHNEIDER, F. ; MANDLER, R. ; KUEPPER, L. ; RASCHER, R. ; SPERBER, P.: An Experimental Study on a Flexible Grinding Tool. In: *Advanced Materials Research* 325 (2011), August, 91-96. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.325.91>. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.325.91. – ISSN 1662-8985

- [VSA11b] VOGT, Christian ; SCHNEIDER, Florian ; ADELSBERGER, Hannes: Modellierung und Bearbeitung optischer Flaechen mittels CAD/CAM-Software. Ilmenau, 2011
- [VSR13] VOGT, Christian ; SCHNEIDER, Florian ; RASCHER, Rolf: Grinding Processes for Silicon Carbide Materials. Berlin : Euspen, 2013. – ISBN 978-0-9566790-2-4, S. 285–288
- [VSR14] VOGT, Christian ; SINZINGER, Stefan ; RASCHER, Rolf: A Study on Elastic Grinding Tools, OSA, 2014. – ISBN 978-1-55752-747-9, OTu3B.3
- [VSR16] VOGT, C. ; SINZINGER, S. ; ROHRBACHER, M. ; RASCHER, R.: Prediction of grinding tool wear and lifetime by using a test bench, 2016, 100090Z
- [VSS⁺10] VOGT, Christian ; SCHINHAERL, Markus ; SCHNEIDER, Florian ; SPERBER, Peter ; RASCHER, Rolf: Investigations on Grinding Tools for Silicon Carbide Based Advanced Materials, OSA, 2010. – ISBN 978-1-55752-893-3, OWD2
- [XXL⁺12] XIE, J. ; XIE, H.F. ; LUO, M.J. ; TAN, T.W. ; LI, P.: Dry electro-contact discharge mutual-wear truing of micro diamond wheel V-tip for precision micro-grinding. 60 (2012), September, 44–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.006>. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.006. – ISSN 08906955
- [YWL12] YU, Guoyu ; WALKER, David ; LI, Hongyu: Implementing a groishing process in Zeeko IRP machines. In: *Applied Optics* 51 (2012), September, Nr. 27, 6637. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.51.006637>. – DOI 10.1364/AO.51.006637. – ISSN 0003-6935, 1539-4522
- [ZG15] ZHAO, Qingliang ; GUO, Bing: Ultra-precision grinding of optical glasses using mono-layer nickel electroplated coarse-grained diamond wheels. Part 1: ELID assisted precision conditioning of grinding wheels. In: *Precision Engineering* 39 (2015), Januar, 56–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.07.006>. – DOI 10.1016/j.precisioneng.2014.07.006. – ISSN 01416359

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Funktionelle Unterteilung von Schleifprozessen | 6 |
| 3.2 | Prinzip Rissausbreitung | 7 |
| 3.3 | Modell zur duktilen und spröden Bearbeitung nach [GLC ⁺ 13] | 8 |
| 3.4 | Prozessfolge Feinoptik | 9 |
| 3.5 | Prüfstand und Funktionsprinzip | 11 |
| 3.6 | Typischer Verlauf des Pfeilhöhenabtrags eines Werkzeugtests, hier Werkzeugpellet Durchmesser 10 mm D15C35 Metallbindung, Schleifradius 30.9 mm, v_c 1.3 $\frac{m}{sec}$, Werkstückmaterial SF57 | 11 |
| 3.7 | Typischer Verlauf der Abtragsgeschwindigkeit eines Werkzeugtests, hier Werkzeugpellet Durchmesser 10 mm D15C35 Metallbindung, Schleifradius 30.9 mm, v_c 1.3 $\frac{m}{sec}$, Werkstückmaterial SF57 | 12 |
| 3.8 | Abtragsverhalten desselben Werkzeugs unter identischen Bedingungen auf unterschiedlichen Materialien | 13 |
| 3.9 | Werkzeuge für asphärische und frei geformte Flächen | 15 |
| 3.10 | Konfokale Aufnahme einer Trennschleifscheibe mit Aluminiumoxidkörnern | 16 |
| 3.11 | Prinzip pyramidenförmig strukturierter Schleifbelag | 19 |
| 3.12 | Kraftmessung während eines Abtragsversuchs mit und ohne ELID-Unterstützung auf Siliziumcarbid in Mäanderbahnen. | 20 |
| 3.13 | Verschleißmodell nach [Mei11] | 21 |
| 3.14 | D91C70 vor (links) und nach dem Abrichten (rechts) | 21 |
| 3.15 | Verschleißmodell Selbstschärfung | 22 |
| 3.16 | Rauheitsverlauf über Probennummer, industrielle Fertigung | 22 |
| 3.17 | Auflösungsvermögen verschiedener Messmittel [CFS17] | 24 |
| 3.18 | Bsp. interferometrische Messung geometrischer Rauheit mit 0,3 μm Amplitude auf gerasteter Probe, Werkzeugdurchmesser 100 mm, Bahnabstand 0,5mm Photographie der Oberfläche (links), Profilanalyse (Mitte) und Topographie (rechts) | 24 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.19 | Topographische, taktile Messungen mit Angabe der Formabweichung PV aus einer vollfaktoriellen Versuchsreihe. Daten und Parameter: D14 C90 Kunststoffbindung, Spiralschleifen Bahnabstand 0.3 mm, Schnitttiefe 0.02 mm | 26 |
| 3.20 | Topographische, taktile Messungen mit Angabe der Formabweichung PV aus einer vollfaktoriellen Versuchsreihe. Daten und Parameter: D20 C90 Hybridbindung, Spiralschleifen, Bahnabstand 0.3 mm, Schnitttiefe 0.02 mm | 27 |
| 5.1 | Bedingungen im Schleifspalt | 34 |
| 5.2 | Versuchsaufbau gPVA | 35 |
| 5.3 | Flussdiagramm Wechselwirkungen Schleifen, das den Zusammenhang zwischen Parametern nach Preston (MRR(P)) und den CNC-Einstellparametern (Drehzahl, Vorschub etc.) aufzeigt | 36 |
| 5.4 | Vorgehen gPVA, siehe auch Abbildung 5.3 Formel 5.2 | 37 |
| 5.5 | Fallbeispiel gPVA-Prozesstest, Kraftverlauf (links) und typische gPVA-Kennlinie (rechts) für Quarz bei v_c 16 m/sec | 38 |
| 5.6 | Typische gPVA-Kennlinie mit Prozessfenster | 39 |
| 5.7 | MRR(P) einer typischen gPVA-Kennlinie, der Ausschlag der Kennlinie zeigt das Ende des Kennfeldes an. | 39 |
| 5.8 | Fehlerbetrachtung MRR und Druck über Prüfkraft | 41 |
| 5.9 | gPVA Fehlerbalkendiagramm, D15 C50, Quarz, v_c 13 $\frac{m}{sec}$ | 42 |
| 5.10 | Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die gPVA-Kennlinie, D15 C50 Bronzebindung auf Quarz | 43 |
| 5.11 | Einfluss des Kühlschmiermittels auf die gPVA-Kennlinie | 44 |
| 5.12 | Materialabhängigkeit der gPVA-Kennlinie bei Fixierung aller anderen Einflussparameter | 45 |
| 5.13 | Fertigungszeichnung der im gPVA-Industrietest zum Zentrierschleifen genutzten Linse (links), Foto Bearbeitungsanlage Arbeitsraum mit glockengespannter Linse (rechts) | 46 |
| 5.14 | gPVA-Industrietest Tandemschleifen Randzylinder, Formelwerk siehe Gleichungen 5.8 bis 5.14 | 46 |
| 5.15 | gPVA-Kennlinie zum Zentrierschleifen der in 5.13 dargestellten Linse, Werkzeug D20 C90 Bronzebindung | 48 |
| 5.16 | EDX-Messung zum Nachweis von Silizium Anhaftungen an einer Schleifscheibe, die unterhalb des gPVA Prozessfensters genutzt wurde | 49 |

| | |
|--|----|
| 5.17 Bsp. Schliffbild vor (links) und nach Optimierung (rechts) | 49 |
| 5.18 Anwendungsbeispiel, Randschleifen einer Stablinse aus Quarzglas . . . | 50 |
| 5.19 Kinematik Beispiel Randschleifen eines Zylinders | 51 |
| 5.20 gPVA Kennfeld D20 C90, Quarzglas mit Betriebspunkten vor und nach Optimierung | 52 |
| 5.21 Aufnahme der Schliffbilder vor und nach Optimierung, Digitalmikrosko- pie 5xVergrößerung | 53 |
| 6.1 gPVA Schleifsequenzplanung | 54 |
| 6.2 gPVA Kennlinien einer Schleifsequenzplanung: Eingezeichnet ist die klas- sische, durch Erfahrungswerte ermittelte Sequenz, sowie die quantiativ mit gPVA ermittelte, optimierte Schleifsequenz | 56 |
| 7.1 Vergleich Schleifbarkeitsklassen nach DIN ISO 12844 und gPVA Kennlinien | 57 |
| 8.1 gPVA für duktiles Schleifen | 59 |
| 9.1 Geometrische Verhältnisse Asphärenschleifen, Werkstückachse und Werk- zeugachse orthogonal | 61 |
| 9.2 Korrekturversuch mit elastischem Werkzeug D14 Kunststoff auf BK7 . | 63 |
| 9.3 Elastische Werkzeuge, Generationen 1-8: 1. Diamantkorn durchsetz- te PU-Folie mit Elastomer-Unterlage 2, 3. Schleiffolie mit Diamant- korn und Elastomer-Unterlage 4, 7. Eingebettete Diamantpellets mit Elastomer-Unterlage 8. Eingebettete Diamantpellets mit 3D-gedrucktem ABS Federelement | 63 |
| 9.4 Versuchsaufbau | 64 |
| 9.5 Konvergenz des reflektierten Lasers | 65 |
| 9.6 Prinzip-Closed-Loop-Polishing | 66 |
| A.1 Bsp: Mikroskopanalyse Abrichten einer D181 Schleifscheibe | 68 |
| A.2 Geschliffener Off-Axis Paraboloid auf SiC | 68 |
| A.3 Hochglänzend geschliffene Sphäre aus Silizium | 68 |
| A.4 Rauheitsmessung auf geschliffener Siliziumkarbid Probe | 69 |
| A.5 Mikrobohrungen in Siliziumkarbid | 69 |
| A.6 Bsp. Ultraschall unterstützte Bearbeitung | 69 |
| A.7 Bsp. Politur Sphären und Asphären | 70 |
| A.8 Bsp. Mikroskopie Silizium infiltriertes Siliziumkarbid | 71 |
| A.9 Bsp. Prototyp elastisches Schleifwerkzeug | 71 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Bewertung von Abrasivprozessen | 6 |
| 3.2 | Kornkonzentrationskennzahlen, Korngehalt in Karat und Prozent [Ard00] | 17 |
| 3.3 | Ursachen Mittelfrequenter Fehler | 24 |
| 3.4 | Normen Schleifen | 28 |
| 5.1 | Parameter Plan-Längsschleifprozess Versuchslauf | 41 |
| 5.2 | Gegenüberstellung der Prozessdaten vor und nach Optimierung | 53 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------|---|
| λ | Kornformfaktor |
| σ | Standardabweichung |
| a | Spiralabstand in mm |
| A_c | Gesamte Kontaktfläche in mm^2 |
| A_f | Zugeführter Materialquerschnitt in mm^2 |
| ANSI | American National Standards Institute |
| a_e | Arbeitseingriff in mm |
| a_p | Schnittbreite in mm |
| C | Kennzahl Kornkonzentration nach DIN 69800 |
| CAM | Computer Aided Manufacturing |
| CCOS | Computer Controlled Optical Surfacing |
| CCP | Computer Controlled Polishing |
| CBN | Kubisches Bornitrid |
| CNC | Computerized Numerical Control |
| D | Diamantkorngröße in Mikrometern |
| d_e | äquivalenter Werkzeugdurchmesser |
| E | Elastizitätsmodul |
| EDM | Electro Discharge Machining |
| EDX | Energiedispersive Röntgenspektroskopie |

| | |
|----------------------|---|
| ELID | ELectrolytic In process Dressing |
| EOS | European Optical Society |
| FEPA | Federation of European Producers of Abrasives |
| f_r | Radialer Vorschub in mm |
| gPVA | Grinding Process Validation Approach |
| H | Härte |
| $h_{c \text{ krit}}$ | Kritische Spannungsdicke |
| h_{cu} | Uncut Chip Thickness |
| HG | Schleifbarkeitsklasse nach DIN ISO 12844 |
| HK | Knoop Härte nach DIN EN ISO 4545- 1 bis -4 |
| IPH | Institut für Präzisionsfertigung und Hochfrequenztechnik |
| JIS | Japanese Industrial Standard |
| k | Werkzeugkonstante |
| K_c | Bruchzähigkeit |
| KSM | Kühlschmiermittel |
| l_g | Kontaktlänge des Werkzeugs in mm |
| Mesh | Anzahl der Maschen pro Quadratzoll des verwendeten Siebes |
| MRR | Materialabtragsrate in $\frac{mm}{sec}$ |
| μm | Mikrometer |
| N | Anzahl aktiver Schneidkörner |
| nm | Nanometer |
| n_w | Drehzahl Werkstück in $\frac{U}{min}$ |
| OFAT | One Factor at A Time |
| OSA | Optical Society of America |

| | |
|-------------|---|
| P | Druck in $\frac{N}{mm^2}$ |
| PV | Form- bzw. Profilfehler (Peak to Valley) |
| Q_w | Bezogenes Zeitspanvolumen |
| R | Werkzeugradius in mm |
| Ra | Mittenrauwert nach DIN EN ISO 4287 |
| Rq | Quadratischer Mittenrauwert nach DIN EN ISO 4287 |
| r_w | Radius Werkstück in mm |
| r_{wi} | Radius Werkstück Innen in mm |
| r_{wo} | Radius Werkstück Außen in mm |
| SPIE | Society of Photographic Instrumentation Engineers |
| SSD | Sub Surface Damages |
| THD | Technische Hochschule Deggendorf |
| u | Materialspezifischer Faktor |
| Upm | Umdrehungen pro Minute |
| v_{fa} | Axiale Vorschubgeschwindigkeit in $\frac{mm}{min}$ |
| v_c | Schnittgeschwindigkeit in $\frac{m}{sec}$ |
| v_f | Vorschubgeschwindigkeit in $\frac{mm}{min}$ |
| v_{fr} | Radiale Vorschubgeschwindigkeit in $\frac{mm}{min}$ |
| v_{ft} | Tangentiale Vorschubgeschwindigkeit in $\frac{mm}{min}$ |
| \dot{V} | Zeitspanvolumen |

Thesen zur Dissertation

1. Durch gezielte Nutzung von Selbstschärfeigenschaften über geeignete Einstellparameter können niedrigere Formabweichungen erreicht werden.
2. Abtrags- und Verschleißverhalten von Schleifwerkzeugen hängen maßgeblich von Werkstoff, Druck, Kühlbedingungen und Relativgeschwindigkeit im Schleifspalt ab.
3. Innerhalb eines Prozessfensters sind Druck und Abtrag direkt proportional.
4. Durch Ausnutzung von Selbstschärfeffekten lassen sich stationäre Prozesse einstellen.
5. CCOS-Prozesse lassen sich auf Schleifwerkzeuge übertragen, um die Genauigkeiten beim Schleifen zu steigern.

Deggendorf, den 20.06.2017

Christian Vogt

Erklärung

Erklärung gemäß Anlage 1 der Promotionsordnung der TU Ilmenau – Allgemeine Bestimmungen

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich/unentgeltlich geholfen:

Niemand

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

Deggendorf, den 20.06.2017

Christian Vogt

Danksagung

...

Während dieser Arbeit begleiteten mich viele Freunde und Kollegen. Sie trugen auf unterschiedlichste Art und Weise dazu bei, die Ideen zu dieser Arbeit zu entwickeln.

Ich danke Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Sinzinger. Mit seiner aufgeschlossenen Art auch an ungewöhnliche Themen heranzugehen, hatte er diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Rascher und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Peter Sperber. Sie eröffneten mir das wissenschaftliche Umfeld an der Technischen Hochschule Deggendorf. Das entgegengebrachte Vertrauen und die übertragenen Befugnisse schufen ungeahnte Möglichkeiten.

Ausdrücklich genannt sei die Unterstützung der Mannschaft des Graduiertenkollegs, die mir im Lauf der Arbeit zu Freunden geworden sind. In vielen Gesprächen und Diskussionen vermittelten sie mir Methodiken zu Planung und Strategie, so dass ich während meiner wissenschaftlichen Arbeit an den gestellten Aufgaben enorm gewachsen bin. Das schuf letzten Endes den entscheidenden Beitrag für einen äußerst erfolgreichen Abschluss: Keep straight, control your breathing and open your heart. Gambate!

*Es ist eine gefährliche Sache, einer Frau zu begegnen,
die einen durch und durch versteht.
So etwas läuft immer in eine Ehe aus.*

Oscar Wilde

Darum widme ich diese Arbeit meiner Frau und unseren beiden Kindern.

...